

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная Школа Новых Производственных Технологий

Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»

Отделение Материаловедения

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Кинематический анализ кардиального катетера для обеспечения роботизированных миниинвазивных операций</b>

УДК 615.472.5:611.142:531.1-047.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Колпащиков Д. Ю.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Арляпов А. Ю.	К.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Хаперская А. В.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю. М.	Д.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Рук. ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Арляпов А.Ю.	К.т.н		

Томск – 2018 г.

## Планируемые результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК-1	Способность разрабатывать технические задания на проектирование и изготовление машин, приводов, оборудования, систем и нестандартного оборудования и средств технологического оснащения;
ПК-8	Способность организовать и проводить научные исследования, связанные с разработкой проектов и программ;
ПК-9	Способность разрабатывать физические и математические модели исследуемых машин, приводов, систем, процессов, явлений и объектов, организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов;
ПК-11	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации,
ПК-12	Способность составлять описания принципов действия и устройства проектируемых изделий и объектов с обоснованием принятых технических решений в области профессиональной деятельности;
ПК-13	Способностью применять новые современные методы разработки технологических процессов изготовления изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности;
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-1	Способность формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки;
ОПК-2	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы;
ОПК-3	Способность использовать иностранный язык в профессиональной сфере;
ОПК-5	Способность организовывать работу коллективов исполнителей, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок выполнения работ, организовывать в подразделении работы по совершенствованию, модернизации выпускаемых изделий, и их элементов
ОПК-12	способностью подготавливать научно-технические отчеты, обзоры, публикации по результатам выполненных исследований;
ОПК-14	способностью выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении;
<b>Общекультурные компетенции</b>	
ОК-1	Способностью к абстрактному мышлению, обобщению, анализу, систематизации и прогнозированию;
ОК-4	Способность на научной основе организовывать свой труд, самостоятельно оценивать результаты своей деятельности, владеть навыками самостоятельной работы в сфере проведения научных исследований;
ОК-5	Способность получать и обрабатывать информацию из различных источников с использованием современных информационных технологий, применять прикладные программные средства при решении практических вопросов с использованием персональных компьютеров с применением программных средств общего и специального назначения

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная Школа Новых Производственных Технологий

Направление подготовки 15.04.01 «Машиностроение»

Отделение Материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:

Рук. ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ61	Колпащикову Д. Ю.

Тема работы:

Кинематический анализ кардиального катетера для обеспечения роботизированных миниинвазивных операций	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	1973/с от 20.03.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	<p>Объект научного исследования: Кинематика роботизированных катетеров для миниинвазивных операций.</p> <p>Предмет научного исследования: Прямая и обратная кинематика роботизированного катетера с двумя секциями изгиба.</p>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<p>Цель исследования: исследовать закономерности движения роботизированного катетера с двумя секциями изгиба.</p> <p>Задачи исследования:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) Установить закономерности для прямой кинематики катетера</li> <li>б) Установить закономерности для обратной кинематики катетера</li> <li>в) Проектирование катетера для эксперимента</li> <li>г) Проектирование стенда для эксперимента</li> </ul>

<b>Перечень графического материала</b>	1. Презентация в MS PowerPoint; 2. Сборочный чертеж стенда – 1 лист формата А1; 3. Схема сборки – 1 лист формата А3.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Исследовательский	Арляпов А. Ю.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Хаперская А. В.
Социальная ответственность	Федорчук Ю. М.
Раздел ВКР на иностранном языке	Пичугова И. Л.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Обзор литературы	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Арляпов А. Ю.	К.Т.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Колпащиков Д. Ю.		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 120 с., 26 рис., 34 табл., 23 источников, 4 прил.

Ключевые слова: прямая кинематика, обратная кинематика, непрерывные роботы, роботизированные катетеры.

Объектом исследования является: прямая и обратная кинематика роботизированного катетера с двумя секциями изгиба.

Цель работы: исследовать закономерности движения роботизированного катетера с двумя секциями изгиба.

В процессе исследования решались следующие задачи: установление закономерностей для прямой кинематики катетера; установление закономерностей для обратной кинематики катетера; проектирование катетера и стенда для экспериментальных исследований.

В результате исследования были получены закономерности для кинематики катетера, позволяющие осуществлять его управление и позиционирование. Также был разработан катетер с двумя секциями изгиба и стенд для его испытаний.

Область применения: миниинвазивная хирургия.

# Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	9
1.1 СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ .....	9
1.2 ОПЕРАЦИИ НА СЕРДЦЕ .....	9
1.3 МАЛОИНВАЗИВНЫЕ ОПЕРАЦИИ.....	10
1.4 КАТЕТЕРНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ .....	10
1.5 КАТЕТЕРЫ.....	12
1.5.1 Ручные катетеры .....	12
1.5.2 Катетеры роботизированные .....	14
1.6 КОНСТРУКЦИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КАТЕТЕРОВ.....	15
1.6.1 Шарниры, используемые в роботизированных катетерах.....	17
1.6.2 Актуаторы.....	18
1.7 МАТЕРИАЛЫ .....	21
1.8 КИНЕМАТИКА .....	22
1.8.1 Прямая кинематика .....	22
1.8.2 Обратная кинематика.....	23
1.8.3 Эвристический алгоритм FABRIK .....	23
1.9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	24
2 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ .....	25
2.1 ПРЯМАЯ КИНЕМАТИКА.....	25
2.2 ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИКА .....	29
2.2.1 Обратная кинематика для одной секции .....	29
2.2.2 Обратная кинематика для нескольких секций .....	31
2.2.3 Описание работы алгоритма.....	34
3 КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ.....	41
3.1 ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КАТЕТЕРА .....	41
3.1.1 Составление технического задания .....	41
3.1.2 Описание конструкции катетера .....	41
3.2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ.....	43
3.2.1 Составление технического задания .....	43
3.2.2 Описание конструкции стенда.....	43
3.3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ СТЕНДА .....	44
3.3.1 Маршрутный лист .....	44
3.3.2 Нормирование технологического процесса сборки.....	46
4 РЕЗУЛЬТАТЫ.....	48
4.1 ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТУ.....	48
4.2 ЭКСПЕРИМЕНТ .....	48
4.3 ВЫВОДЫ .....	53

<b>5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....</b>	<b>55</b>
5.1 ПРЕДПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ.....	55
5.2 АНАЛИЗ КОНКУРЕНТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ПОЗИЦИИ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ.....	56
5.3 FAST-АНАЛИЗ .....	58
5.3 SWOT-АНАЛИЗ.....	62
5.4 ИНИЦИАЦИЯ ПРОЕКТА .....	63
5.4.1 Цели и результат проекта .....	63
5.4.2 Организационная структура проекта .....	64
5.4.3 Ограничения и допущения проекта.....	65
5.5 ПЛАН ПРОЕКТА .....	65
5.6 БЮДЖЕТ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	68
5.6.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.....	68
5.6.2 Заработная плата .....	69
5.6.3 Отчисления на социальные нужды.....	71
5.6.4 Накладные расходы.....	71
5.7 РЕЕСТР РИСКОВ ПРОЕКТА .....	72
5.8 МАТРИЦА ОТВЕТСТВЕННОСТИ .....	73
5.9 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА .....	74
5.10 ОЦЕНКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ НИР .....	74
5.11 ОЦЕНКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	77
5.11.1 Интегральный показатель финансовой эффективности .....	77
5.11.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности .....	78
5.11.3 Интегральный показатель эффективности разработки.....	79
<b>6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....</b>	<b>82</b>
6.1 АНАЛИЗ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ФАКТОРОВ .....	82
6.1.1 Микроклимат в помещении.....	83
6.1.2 Производственный шум.....	85
6.1.3 Освещение .....	87
6.1.4 Повышенная напряженность электрического поля .....	91
6.2 ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.....	92
6.3 ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	94
6.4 ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ .....	96
6.5. ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ АКТЫ .....	97
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>99</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>102</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>	<b>118</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>119</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>121</b>

## **Введение**

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) – это группа болезней сердца и кровеносных сосудов. Причинами ССЗ являются нарушения деятельности сердца и кровеносных сосудов. В число этих заболеваний входят ишемическая болезнь сердца, цереброваскулярная болезнь, повышенное кровяное давление, ревматический порок сердца, врожденный порок сердца.

На данный момент одним из наиболее прогрессивных методов лечения данных заболеваний является кардиальная катетеризация – минимально инвазивная процедура, выполняемая путем вставки катетерной трубки через небольшой разрез в бедренную вену и продвижение катетера через вену в сердце. Целью этой интервенционной процедуры является достижение определенных мест внутри сердца и проведение обследования или лечения.

В современных роботизированных системах используются катетеры с несколькими секциями изгиба. Они совершают движения относительно друг друга и тем самым достигают требуемой точки. На данный момент позиционирование кончика катетера осуществляется хирургом вручную.

Основная проблема, связанная с управлением и позиционированием катетера, связана с перемещением катетера в нужное место и позиционированием наконечника инструмента. Однако цель не только достигнуть требуемого места, но и правильно сориентировать инструмент.

В настоящее время существуют алгоритмы обратной кинематики, позволяющие осуществить автоматическое позиционирование катетера в определенной точке. Однако они либо не способны контролировать ориентацию кончика катетера [1–4], либо предназначены для работы с катетером, состоящим только из одной секции изгиба [5].

В данной работе представлен алгоритм обратной кинематики, который способен обеспечить достижение требуемой точки с учетом заданной ориентации для катетера с несколькими секциями.



## **1 Обзор литературы**

### **1.1 Сердечно-сосудистые заболевания**

Сердечно-сосудистые заболевания – это группа болезней сердца и кровеносных сосудов. Причинами ССЗ являются нарушения деятельности сердца и кровеносных сосудов. В число этих заболеваний входят ишемическая болезнь сердца (инфаркты), цереброваскулярная болезнь (инсульт), повышенное кровяное давление (гипертония), болезнь периферических артерий, ревматический порок сердца, врожденный порок сердца и сердечная недостаточность.

По данным ВОЗ ССЗ являются основной причиной смерти во всем мире. По их оценкам, в 2012 году от ССЗ умерло 17,5 миллиона человек, что составило 31% всех случаев смерти в мире [6]. По прогнозам ВОЗ, к 2020 году количество смертных случаев от ССЗ в мире достигнет 25 миллионов.

В 2015 году в России смертность от ССЗ составила почти 48,7% от общего количества смертей по стране, тогда как в Великобритании (29%), Франции (22%) и Германии (35%) этот показатель ниже [7]. Причем большая часть смертей приходится на людей трудоспособного возраста, что представляет собой значительную экономическую и социальную проблему. С 2006 по 2009 год, экономические затраты на лечение ССЗ составили 3% от ВВП [8].

### **1.2 Операции на сердце**

Основным методом лечения пациентов с ССЗ является оперативное вмешательство на открытом сердце с использованием искусственного кровообращения. В ходе операции деятельность сердца останавливается, и пациент подключается к аппарату искусственного кровообращения (аппарат «сердце – легкие»). Несмотря на то, что техника подобных операций отработана и уровень госпитальной летальности является низким, послеоперационные осложнения, связанные с применением искусственного кровообращения

(воздушная микроэмболия, гипоксия жизненно важных органов, системная воспалительная реакция, гемолиз) остаются серьезной проблемой. Таким образом, сегодня широкий спектр кардиохирургических операций, осуществляемых на открытом сердце, приводит к тяжелым послеоперационным осложнениям с длительной реабилитацией и представляет собой важную проблему кардиологии.

### **1.3 Малоинвазивные операции**

Благодаря передовым технологиям, а также с целью избежать сложных инвазивных операций, для лечения различных заболеваний сердца в настоящее время применяются малоинвазивные процедуры. Малоинвазивная процедура это кардиологическая операция, выполняемая через небольшой разрез, позволяющая справляться с некоторыми заболеваниями сердца. Такие операции, например, помогают преодолеть проблемы с клапанами сердца посредством небольших отверстий, сделанных между ребрами и стенкой грудной клетки. Через эти отверстия вводятся хирургические инструменты и камера для выполнения различных манипуляций. Преимущество этой малоинвазивной процедуры в основном состоит в отсутствии необходимости выполнять разрез грудной клетки длиной 30 см, считающийся одним из наиболее болезненных и трудных этапов операции на открытом сердце. Это преимущество позволяет значительно сократить время реабилитации и период госпитализации по сравнению с операциями на открытом сердце. Кроме того появление послеоперационных осложнений крайне мала.

### **1.4 Катетерные процедуры**

В качестве альтернативы в последние десятилетия активно развиваются катетерные эндоваскулярные процедуры, позволяющие осуществлять коррекцию некоторых сердечных патологий на работающем сердце без применения искусственного кровообращения.

Катетеризация сердца (рисунок 1.1) – миниинвазивная процедура, которая проводится с лечебными и диагностическими целями при ССЗ. При проведении процедуры кардиолог вводит пациенту тонкостенную гибкую трубку (катетер) через одну из артерий, расположенных на руке, шее или в паху. Затем катетер под контролем средств визуализации проводится по сосудистому руслу и достигает сердца.



Рисунок 1.1. Схема катетеризации

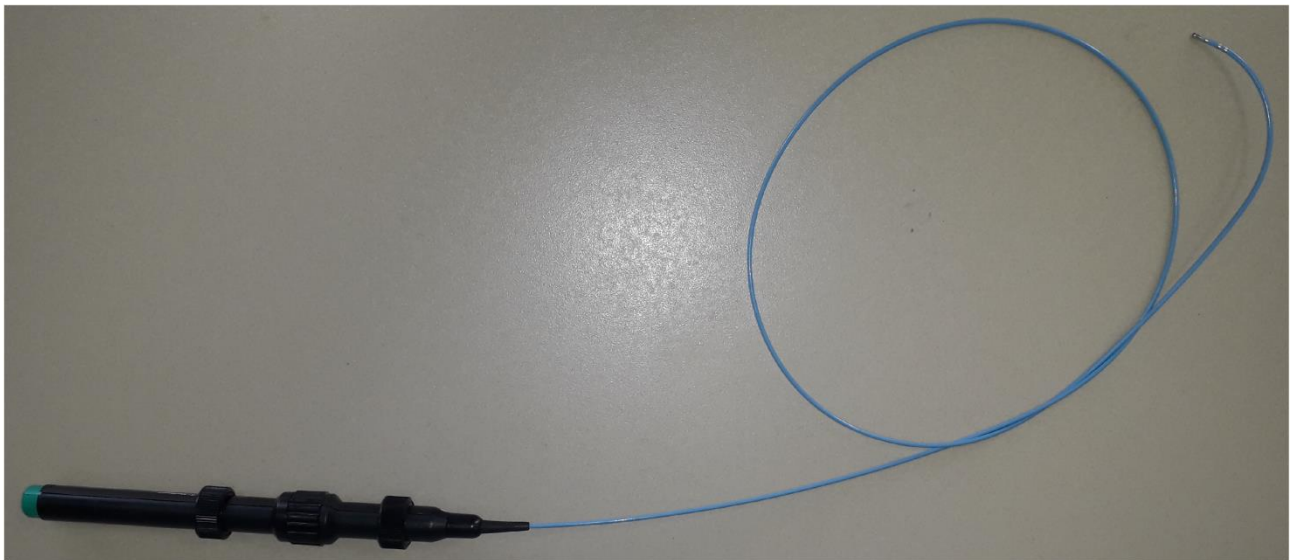
В последние несколько лет достигнут значительный прогресс в эндоваскулярных методах диагностики и лечения ССЗ. Доступность новых методов визуализации и разработка доставляющих катетерных устройств позволяют выполнять различные вмешательства на работающем сердце без применения искусственного кровообращения, в том числе стентирование сосудов, радиочастотную абляцию при нарушениях ритма сердца и закрытие дефектов межпредсердной и межжелудочковой перегородок. Однако, несмотря на достигнутые результаты, большой спектр реконструктивных вмешательств сегодня осуществляется только на открытом сердце с применением искусственного кровообращения.

## **1.5 Катетеры**

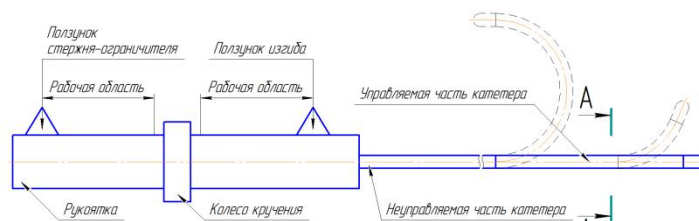
Катетеры - это медицинские устройства, которые можно вставлять в организм для лечения заболеваний или выполнять хирургическую процедуру. Они могут быть вставлены в полость тела, канал или сосуд. Функционально они позволяют дренаж, введение жидкостей или газов, доступ хирургическими инструментами, а также выполняют множество других задач в зависимости от типа катетера. Процесс введения катетера - это катетеризация. В большинстве случаев катетер представляет собой тонкостенную гибкую трубку из медицинских материалов, хотя катетеры доступны на разных уровнях жесткости в зависимости от применения. Катетеры бывают ручные и роботизированные.

### **1.5.1 Ручные катетеры**

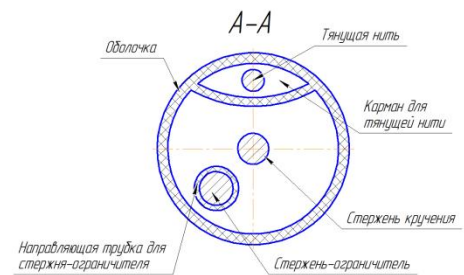
Ручной катетер представляет собой гибкую тонкостенную трубку (рисунок 1.2а) из медицинских полимеров на одном конце которой находится хирургический инструмент. Трубка поделена на две части – управляемую и неуправляемую. Обе части обладают минимальной жесткостью, необходимой для предотвращения повреждения стенок сосудов и сердца при прохождении катетера. Однако, для того чтобы ограничить движение только управляемой частью, неуправляемая часть делается более жесткой за счет оплетки металлической проволокой.



а)



б)



в)

Рисунок 1.2. Конструкция ручного катетера: а – внешний вид катетера для абляции; б - схема катетера для абляции; в - внутреннее устройство управляемой части катетера

Хирург осуществляет управление изгибом катетера двигая ползунки на рукоятке (рисунок 1.2б). Для осуществления линейного перемещения катетера и его вращения вокруг своей оси хирург перемещает саму рукоятку.

Через трубку проходят различные элементы конструкции, отвечающие за движение катетера (рисунок 1.2в):

Тянущая нить – основной элемент управления катетером. Она обеспечивает изгиб катетера в одной плоскости за счет нецентрального сжатия. Нить соединена с кончиком катетера и соответствующим ползуном на рукоятке. Когда хирург тянет ползунок, то нить нецентралью сжимает трубку катетера и происходит изгиб.

Стержень кручения – дополнительный элемент управления. Обеспечивает закручивание управляемой части катетера для достижения труднодоступных мест. С одной стороны он консольно закреплен в центре кончика катетера, а с другой на колесе кручения. При кручении этого стрежня начинает закручиваться управляемая часть катетера.

Стержень ограничитель – дополнительный элемент управления. Позволяет уменьшить управляемую часть катетера, тем самым позволяя уменьшить радиус изгиба. Он представляет собой жесткий, относительно управляемой части, стержень, который перемещается по направляющей трубке с помощью движения соответствующего ползунка.

Также для достижения труднодоступных мест используется связка из управляемой оболочки и стандартного катетера проходящего сквозь него.

Данный метод лечения обладает меньшей травматичностью, чем операции на открытом сердце. Однако, существующие катетеры, предназначенные в основном для мануального управления, требуют дополнительных временных затрат на позиционирование, что приводит к повышению дозы рентгеновского облучения как пациента, так и хирурга. Кроме того, катетер нестабилен, и отсутствует синхронизация его движения относительно движущихся структур сердца.

### **1.5.2 Катетеры роботизированные**

В последние два десятилетия в области сердечно-сосудистой хирургии активно применяются роботизированные хирургические операции. В отличие от традиционных операций на сердце, современные роботизированные катетерные системы (Hansen Medical, Stereotaxis, Boston Scientific, Magnetecs) обладают меньшей травматичностью, а использование роботизированных инструментов обеспечивает возможность прецизионной работы в ограниченном пространстве и уменьшает время операции [9].

Серьезным недостатком современных роботизированных систем является громоздкость и дороговизна оборудования. Кроме того, использование систем, осуществляющих управление кончиком катетера при помощи магнитного поля (Stereotaxis, Magnetecs) ограничивается высокими требованиями к установке подобного оборудования.

### 1.6 Конструкция роботизированных катетеров

Все катетеры являются непрерывными роботами – управляемой структурой, которая формирует кривые с непрерывными касательными векторам [10]. Этот класс роботов является непрерывно изгибающимися эластичными структурами, которые имеют стремящееся к бесконечности число сочленений, и как следствие, бесконечное число степеней свобод, длины их жестких соединений стремятся к нулю и у них отсутствуют различимые поворотные шарниры и жесткие сочленения [11].

В роботизированных катетерах (рисунок 1.3) используются более жесткие материалы, чем в ручных, а их гибкость обеспечивается за счет микромеханических шарниров [12]. Непрерывно изгибающиеся роботы с явно выраженными шарнирами и жесткими сочленениями называются псевдонепрерывными.



Рисунок 1.3. Artisan Extend Control Catheter – роботизированный катетер

В ручных катетерах используется только одна секция изгиба (рисунок 1.4а), тогда как в роботизированных катетерах может использоваться несколько [13]. Большое количество секций увеличивает рабочую области и гибкость катетера, но усложняет его управление. Катетеры с несколькими секциями делятся на последовательные (рисунок 1.4б) и концентрические (рисунок 1.4в).

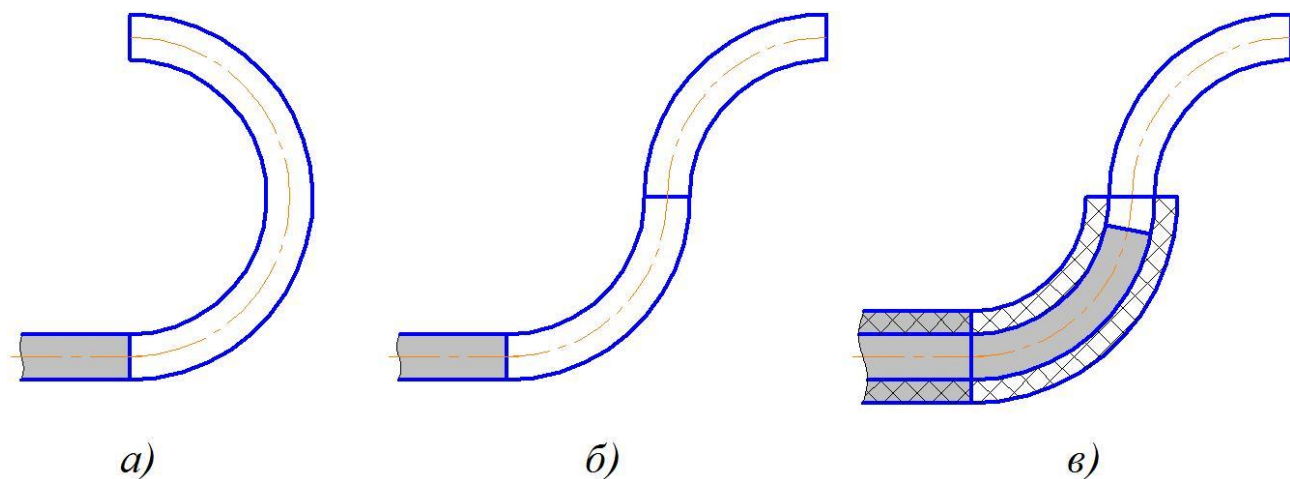


Рисунок 1.4. Конструкции катетеров. Серым цветом отмечены неуправляемые части. а) Катетер с одной секцией изгиба; б) Катетер с двумя последовательными секциями изгиба; в) Катетер с двумя концентрическими секциями изгиба

Последовательные катетеры представляют собой несколько секций изгиба установленных друг за другом. Секции могут быть сконструированы так, чтобы иметь любую требуемую форму, и могут быть связаны между собой различными типами соединений, что позволяет одно-, двухплоскостное или пространственное относительное движение. Несколько секций можно объединить вместе, чтобы сформировать один управляемый сегмент, так чтобы было возможно получение S-образной кривой. Пример такого катетера описан в патенте Kabe et al. [14], который предназначен для ремонта митрального клапана и других вмешательств на основе катетера с имплантацией устройства.

Концентрические катетеры содержат множество трубок, расположенных внутри друг друга. Трубки способны перемещаются внутри друг друга. Они



могут иметь различное предпочтительное направление изгиба, в зависимости от их конструкции и материала, или могут управляться активно. Пример такого катетера описан в патенте [12], который используется в коммерчески доступной системе Sensei X Robotic Catheter System (Hansen Medical, Mountain View, CA, USA).

### 1.6.1 Шарниры, используемые в роботизированных катетерах

Роботизированные катетеры для обеспечения устойчивости обычно производятся из материалов более жестких, чем используются в ручных. Для обеспечения гибкости в роботизированных катетерах используются различные виды шарниров (рисунок 1.5).

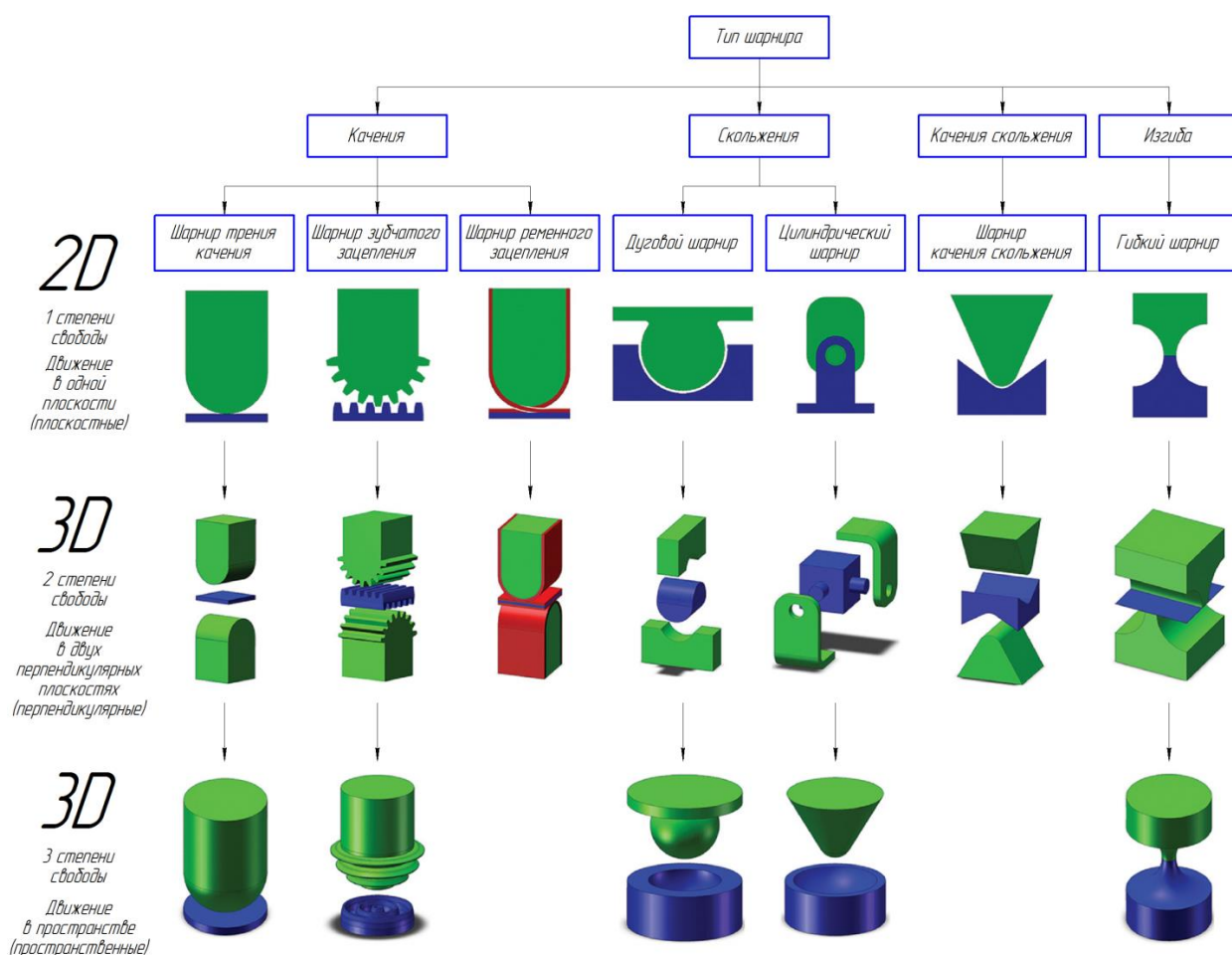


Рисунок 1.5. Шарниры, используемые в роботизированных катетерах [15]

Представленные выше шарниры разнятся по своей эффективности (таблица 1.1). Самым эффективным типом шарнира является гибкий микромеханический [16] шарнир. Из них в равной степени эффективны

микромеханические шарниры Гука и сферические микромеханические шарниры.

Таблица 1.1. Качественная оценка эффективности типов шарниров по критериям связанным с их геометрией и движением. Эффективность оценивается как хорошая (1), нейтральная (0) или слабая (2). [15]

Тип шарнира			Критерии							
			Сопротивле- ние осевому разделению	Сопротивление поперечному разделению	Сопротивление проскальзыванию	Жесткость на кручение	Эффективность использования пространства	Возможность обеспечения внутренних каналов	Общая сложность конструкции	Итого
Качения	Трения	Плоскост- ные	-	-	-	-	-	+	+	-3
		Перпенди- кулярные	-	-	-	-	0	+	+	-2
		Пространст- венные	-	-	-	-	+	0	+	-2
	Зубчатая	Плоскост- ные	-	+	+	+	-	0	-	0
		Перпенди- кулярные	-	+	+	+	0	0	-	1
		Пространст- венные	-	+	+	-	+	-	-	-1
	Ременная	Плоскост- ные	+	+	+	+	-	-	-	1
		Перпенди- кулярные	+	+	+	+	0	-	-	2
Сколь- жения	Дуговая	Плоскост- ные	0	+	+	+	-	+	0	3
		Перпенди- кулярные	0	+	+	+	0	+	0	4
		Пространст- венные	0	+	+	0	+	+	0	4
	Цилиндри- ческая	Плоскост- ные	+	+	+	+	-	0	-	2
		Перпенди- кулярные	+	+	+	+	+	0	-	4
Качения скольжения		Плоскост- ные	-	0	0	0	0	+	+	0
		Перпенди- кулярные	-	0	0	0	-	+	+	1
		Пространст- венные	-	-	0	-	+	+	+	0
Изгиба		Плоскост- ные	+	+	+	+	-	+	+	5
		Перпенди- кулярные	+	+	+	+	0	+	+	6
		Пространст- венные	+	+	+	0	+	+	+	6

## 1.6.2 Актуаторы

Актуатор – законченное универсальное исполнительное устройство с мотором или без мотора (электромеханическое или механическое), управляемое с помощью устройства управления. Актуаторы отвечают за управление изгибом

катетера. По способу воздействия на актуаторы делятся на несколько типов (рисунок 1.6). Однако на практике в роботизированных системах используются только механическое воздействие за счет тянущих нитей или воздействие с использованием магнитного поля.

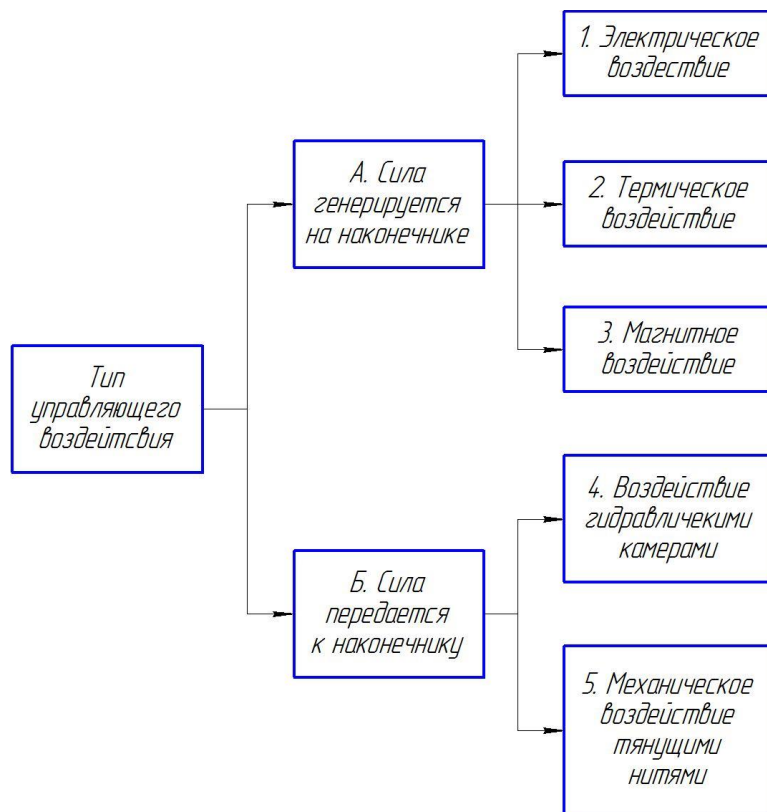


Рисунок 1.6. Типы управляющих воздействий [13]

В настоящее время в клинической практике применяются две роботизированные катетерные системы: электромеханическая и магнитно-управляемая системы.

Роботизированная навигационная система Sensei X от Hansen Medical (рисунок 1.7) - это управляемая катетерная система для электрофизиологических вмешательств в сердце [17]. Рабочее место хирурга находится в диспетчерской, тогда как роботизированный катетер остается в операционной. Таким образом, врач не подвергается рентгеновскому излучению, которое необходимо для визуализации положения катетера. Система обеспечивает 6 степеней свободы и позволяет осуществлять передачу движений хирурга к концу катетера, в то время как внешняя оболочка обеспечивает стабильность. Система Sensei X работает с

катетером, который предназначен для обеспечения одновременного контроля кончика катетера и оболочки, что позволяет обеспечить более точное позиционирование. Управление катетером достигается за счет регулирования натяжения нитей, проложенных по каналам в двух concentрических оболочках. Положение нитей регулируется за счет наматывания и разматывания нитей закрепленных на валы приводов. Врач дистанционно управляет кончиком катетера с помощью трехмерного устройства ввода на рабочей станции. Данная система обладает повышенной безопасностью и возможность уменьшить время под облучением для врача.



Рисунок 1.7. Sensei X от Hansen Medical

Система Niobe от Stereotaxis, Inc., (рисунок 1.8) для роботизированных электрофизиологических процедур использует дистанционное управление катетером с помощью магнитного поля [18]. Система состоит из двух внешних постоянных магнитов со сфокусированным полем, установленных манипуляторе на обе стороны операционного стола. Изменяя их ориентацию и положение однородное магнитное поле управляет кончиком катетера внутри пациента. В пределах магнитного поля магнитный инструмент может перемещаться в любом направлении. Чтобы уменьшить радиационное облучение врача, система Niobe также имеет отдельную рабочую станцию.



Рисунок 1.8. Система Niobe от Stereotaxis, Inc

Ручные катетеры в основном имеют всего одну тянущую нить и за счет неё совершают всего одно движение – одноплоскостной изгиб, который за счет вращения рукоятки катетера хирургом становится пространственным. Роботизированные же катетеры имеют несколько нитей расположенных по периметру катетера и совершают пространственный изгиб за счет их комбинации.

### **1.7 Материалы**

Для изготовления катетеров используются различные материалы медицинского назначения: от гибких полимерных резин до никелида титана (NiTi - Нитинол), титана или стали. В ручных катетерах в основном используются полимерные резины с металлической оплеткой. Для производства роботизированных катетеров используется Нитинол из-за свойства сверхупругости. Эффект Сверхупругость проявляется как способность Нитиноловых сплавов к большой (до 8%) «упругой» деформации.

Изделие должно соответствовать требованиям ГОСТ ISO 10993-1-2011 для изделий, присоединяемым извне в циркулирующей крови с кратковременным контактом [19].

## 1.8 Кинематика

Кинематика рассматривает движение тел в роботизированном механизме без учета сил и/или крутящих моментов, которые вызывают движение. Поскольку роботизированные механизмы по своей сути разработаны для движения, то кинематика является наиболее фундаментальным аспектом дизайна, анализа, контроля и моделирования.

### 1.8.1 Прямая кинематика

Задача прямой кинематики заключается в том, чтобы зная геометрическую структуру и относительное положение и ориентацию всех сегментов механизма, найти их координаты в пространстве.

На данный момент известно два подхода к прямой кинематике непрерывных роботов: дискретный (рисунок 1.9а) и на основе постоянной кривой (рисунок 1.9б). Оба подхода могут быть использованы и для псевдонепрерывных роботов.

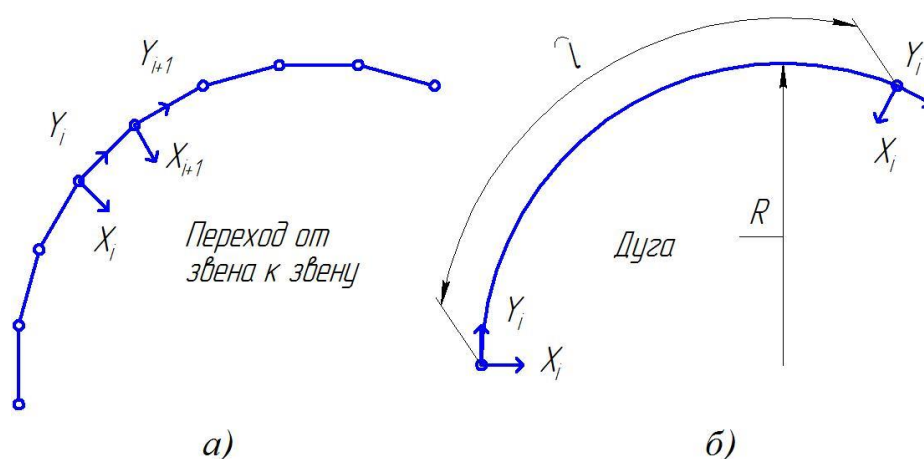


Рисунок 1.9. а) Дискретный подход; б) Подход на основе постоянной кривой

В дискретном подходе робот представлен состоящим из жестких стержней, последовательно соединённых шарнирами. В этом подходе расчет производится с помощью представлений Денавита–Хартенберга.

В отличие от дискретной модели, кинематика на основе постоянной кривой представляют непрерывную геометрию робота конечным числом взаимно касательных изогнутых сегментов, каждое из которых имеет постоянную кривизну вдоль ее длины. Следует отметить, что здесь «постоянство» относится к инвариантности относительно длины дуги, а не времени. В этом подходе кривизна, длина дуги и угол каждого сегмента образуют набор конфигурационных координат, которые полностью описывает форму робота, то есть положение и ориентацию в любой точке. Модели на основе постоянной кривой используются для расчета прямой кинематики непрерывных роботов наиболее широко [20].

### **1.8.2 Обратная кинематика**

Задача обратной кинематики состоит в том, чтобы зная геометрическую структуру робота и координаты сегментов в пространстве найти их относительно положение и ориентацию. За счет алгоритмов обратной кинематики осуществляется автоматическое позиционирование катетеров. Для решения обратной кинематики применяются аналитические и численные методы [21].

В настоящее время существуют алгоритмы обратной кинематики, позволяющие осуществить автоматическое позиционирование катетера в определенной точке. Однако они либо не способны контролировать ориентацию кончика катетера [1–4], либо предназначены для работы с катетером, состоящим только из одной секцией изгиба [5].

### **1.8.3 Эвристический алгоритм FABRIK**

Этот метод, в отличие от обратного преобразования, обращает задачу поиска позиции звена в задачу поиска точки на прямой. Он достигает минимизации ошибки путём подстройки угла каждого звена (рисунок 1.10). Происходит обход всей цепи, начиная с последнего звена (прямое следование), с подстройкой угла каждого обойдённого звена, после чего, происходит обход цепи уже в обратном направлении (обратное следование). Благодаря этому,



расчет обходится всего несколькими итерациями, имеет низкую стоимость вычислений и визуально естественную позу в результате [22]. FABRIK также без проблем справляется с наложением ограничений, а также использованием нескольких цепей и/или конечных точек.

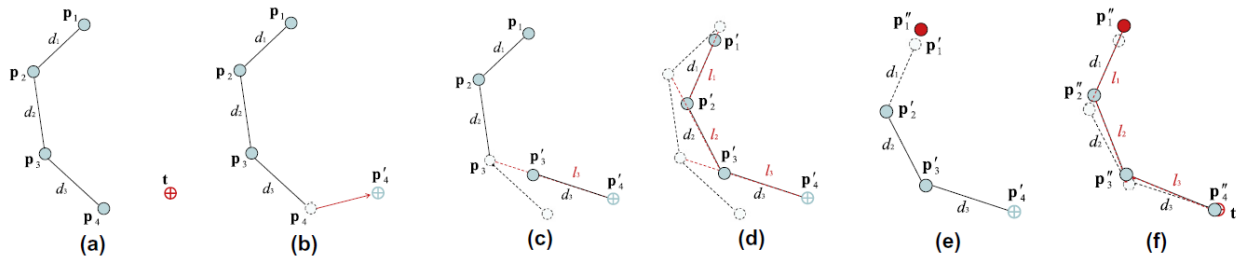


Рисунок 1.10. Метод FABRIK [22]

## 1.9 Заключение

Из обзора литературы следует, что наиболее перспективным способом лечения ССЗ является кардиальная катетеризация. Кардиальная катетеризация роботизированными катетерами является наиболее эффективным способом с позиции производительности и безопасности. В конструкции роботизированных катетеров чаще всего используются гибкие шарниры для придания роботу достаточной подвижности. Самым распространённым способом управления катетером является управление тянущими нитями. На данный момент роботизированные катетеры управляются вручную хирургами. Это связано с недостатками существующих способов решения обратной кинематики для данного вида роботов. В данной работе для определения закономерностей прямой кинематики будет использован подход на основе постоянной кривой. Для определения закономерностей обратной кинематики будет использован метод FABRIK, модифицированный для работы с роботизированными катетерами.



## 2 Кинематический анализ

### 2.1 Прямая кинематика

В данной работе прямая кинематика разрабатывалась для катетера с микромеханическими шарнирами, который является псевдонепрерывным роботом. Для этого класса роботов применимы те же алгоритмы и подходы, что и для непрерывных роботов [10].

В данной работе был использован подход к прямой кинематике на основе постоянной кривой (рисунки 2.1 и 2.2). Катетер представляет собой набор из  $Q$  секций изгиба. В данном подходе каждая секция изгиба  $i$  катетера представлена как дуга постоянной длины  $S_i$ . Длина дуги  $S_i$  зависит от количества сегментов  $N_i$  равной длины  $L$ , составляющих секцию изгиба  $i$ . Углом изгиба секции  $i$  является центральный угол  $\alpha_i$  дуги  $S_i$ . Точка  $P_{i-1}$  является началом секции  $i$ , причем начало катетера и первой секции совпадают, а точка  $P_i$  концом. Дуга строиться по точкам  $P_{i-1}$ ,  $P_i$  и касательной  $\bar{Z}_i$ , проходящей через точку  $P_{i-1}$ . Касательная  $\bar{Z}_i$ , является осью секции  $i$  и определяется по вектору  $\overline{P_{i-1}P_i}$ , когда секция  $i$  находится в распрямленном состоянии. Оси  $\bar{X}_i$  и  $\bar{Y}_i$  перпендикулярны друг другу и оси  $\bar{Z}_i$ . Следует отметить, что ось  $\bar{Y}_i$  является нормалью к плоскости изгиба предыдущей секции  $i - 1$ . Плоскость изгиба – плоскость, в которой лежат все точки секции. Оси  $\bar{X}_i$ ,  $\bar{Y}_i$  и  $\bar{Z}_i$  составляют матрицу поворота  $V_i$ , которая является Системой Координат (СК) секции  $i$ . СК катетера совпадает с СК первой секции. СК катетера определяет ориентацию катетера в глобальной СК. Угол поворота  $\omega_i$  секции  $i$  является углом между осью  $\bar{X}_i$  и проекцией дуги  $S_i$  на плоскость  $\bar{X}_i\bar{Y}_i$ .

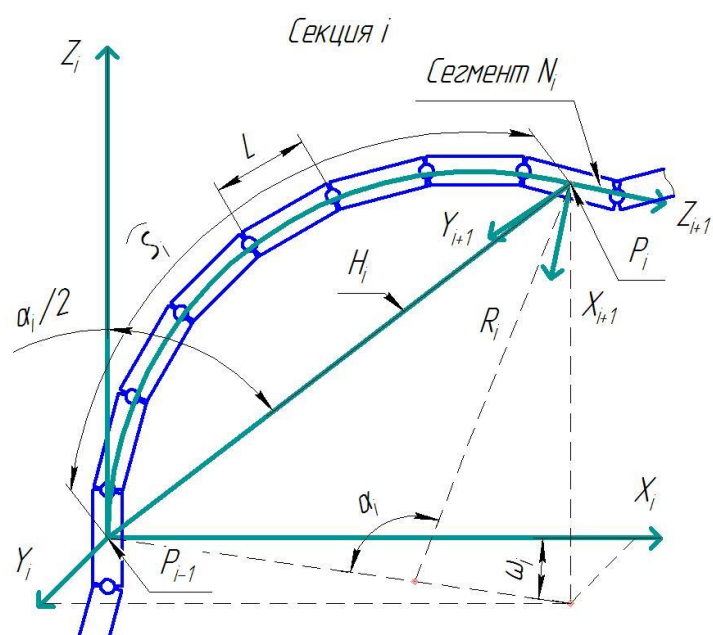


Рисунок 2.1. Прямая кинематика – одна секция

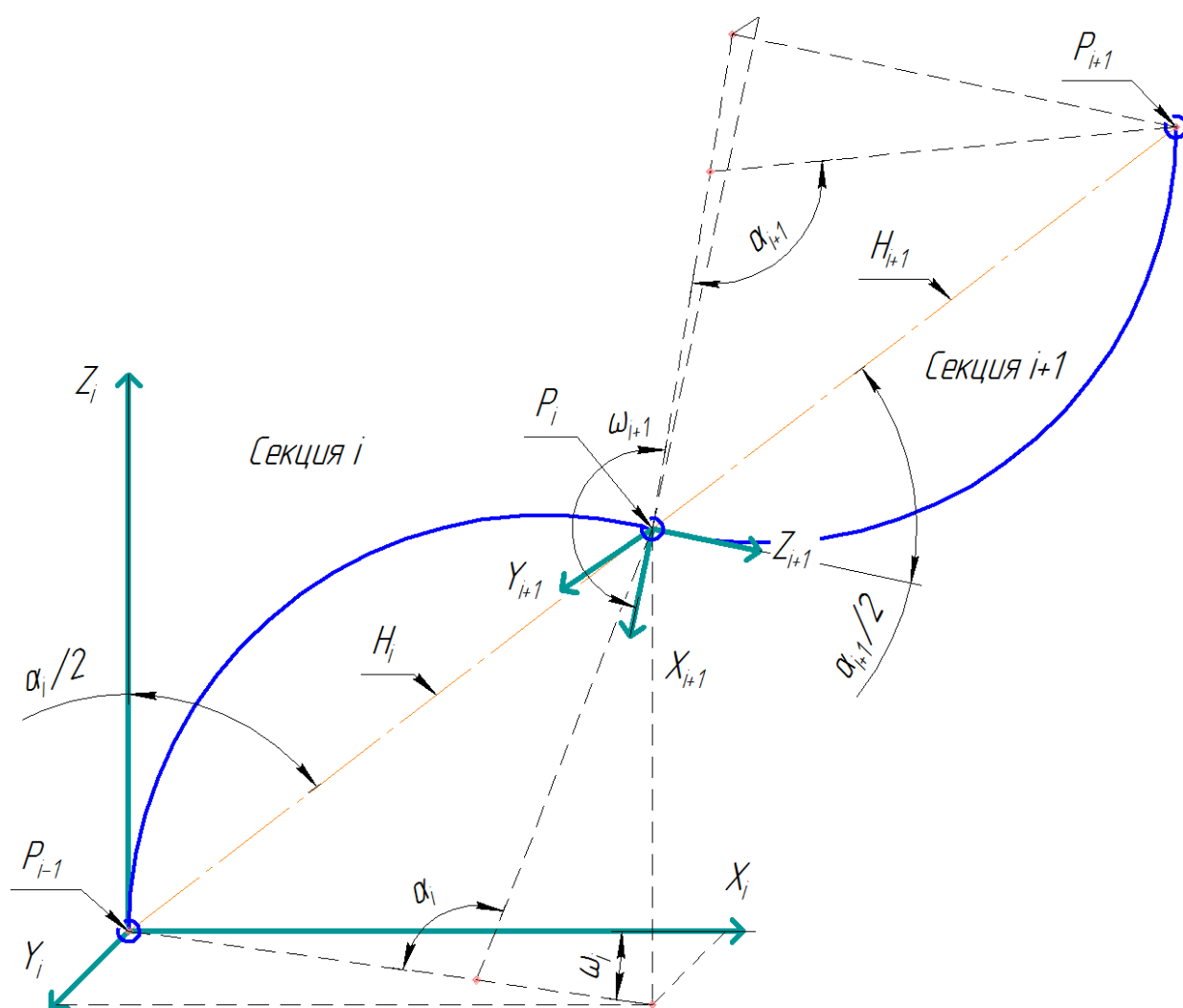


Рисунок 2.2. Прямая кинематика – несколько секций

Прямая кинематика получает на вход количество секций в катетере  $Q$ , количество сегментов  $N$  в каждой из них и длину сегмента  $L$ , необходимые для определения длин дуг  $S$ . Углы изгиба  $\alpha$  и углы поворота  $\omega$ , определяющие конфигурацию катетера в пространстве. А также СК катетера  $V_1$  и координату его начала  $P_0$ , определяющие ориентацию и положение катетера в глобальной СК. Входные данные для прямой кинематики сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Входные данные для прямой кинематики:

Количество секций в катетере	$Q$
Количество сегментов в секции	$N$
Длина сегмента	$L$
Координаты начала катетера	$P_0$
Угол изгиба (центральный угол)	$\alpha$
Угол поворота	$\omega$
СК катетера	$V_1$

На выходе прямая кинематика выдает координату кончика катетера  $P_Q$  и СК  $V_{Q+1}$ , ось  $\overline{Z_{Q+1}}$  которой определяет ориентацию кончика катетера. Поскольку расчет производится последовательно, с первой к последней, то на выходе также можно предоставить координаты концов каждой секции  $P_i$ , их вектора ориентации  $\overline{X_{i+1}}, \overline{Y_{i+1}}, \overline{Z_{i+1}}$ . Также можно определить промежуточные точки  $P_i^J$  для построения конфигурации секции.

Расчет ориентации конца секции  $\overline{Z_{i+1}}$  производится вращением СК секции  $V_i$  сначала на угол поворота  $\omega_i$ , а затем на угол изгиба  $\alpha_i$ . Расчет координат конца секции  $P_i$  производится поворотом хорды  $H_i$  дуги  $S_i$  сначала на  $\omega_i$  – угол поворота, а затем  $\alpha_i/2$  – на половину угла изгиба. Хорда  $H_i$  является отрезком, соединяющим точки начала  $P_{i-1}$  и конца  $P_i$  дуги  $S_i$  и её длина зависит от угла изгиба  $\alpha_i$  секции. Длина дуги  $S_i$  постоянна. Координаты и ориентация секции катетера определяются следующим образом:

1. Поворот СК  $V_i$  вокруг оси  $\bar{Z}_i$  на угол поворота  $\omega_i$ . Результатом поворота является СК  $V_i'$ , ось  $\bar{Y}_i'$  которой является осью  $\bar{Y}_{i+1}$ . Ось  $\bar{Y}_{i+1}$  является нормалью к плоскости изгиба секции  $i$ .
2. Поворот СК  $V_i'$  вокруг оси  $\bar{Y}_{i+1}$  на угол поворота  $\alpha_i/2$ . Результатом поворота является СК  $V_i''$ , на оси  $\bar{Z}_i''$  которой лежит отрезок хорды  $H_i(\alpha_i)$ .
3. Перемещение вдоль оси  $\bar{Z}_i''$  на длину хорды  $H_i(\alpha_i)$ . Результатом перемещения является точка конца секции  $P_i$ .
4. Поворот СК  $V_i''$  вокруг оси  $\bar{Y}_{i+1}$  на угол поворота  $\alpha_i/2$ . Результатом поворота является СК  $V_{i+1}$ , ось  $\bar{Z}_{i+1}$  которой определяет ориентацию конца секции.

Координаты и ориентация катетера  $T_{TIP}$  могут быть найдены с помощью матриц преобразования как:

$$T_{TIP} = T_C \cdot \prod_{i=1}^Q \left( T_Y(\omega_i) \cdot T_Z\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) \cdot T_{ZLin}(H_i(\alpha_i)) \cdot T_Z\left(\frac{\alpha_i}{2}\right) \right), \quad (2.1)$$

Где  $T_Y$  – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси  $Y$ ,  $T_Z$  – однородная матрица элементарного поворота вокруг оси  $Z$ ,  $T_{ZLin}$  – матрица сдвига по оси  $Z$ .

Где  $T_C$  – однородная матрица катетера, состоящая из его СК  $V_1$  и координат начала  $P_0$ :

$$T_C = \begin{bmatrix} V_1 & P_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

Поскольку хорда  $H_i$  соединяет середину первого и последнего сегментов секции, то её длина в зависимости от угла изгиба  $\alpha_i$  определяется как:

$$H_i(\alpha_i) = 2 \cdot R_i \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2}, \quad (2.3)$$

Где  $R_i$  – радиус изгиба секции  $i$ :

$$R_i = \frac{S_i}{\alpha_i} \sin \frac{\alpha_i}{2}, \quad (2.4)$$

Где  $S_i$  – длина дуги  $i$ :

$$S_i = L \cdot (N_i - 1), \quad (2.5)$$

Промежуточные точки  $P_i^J$  для построения конфигурации секции  $i$  могут быть найдены подстановкой в выражение (2.1) промежуточных углов  $\alpha'_i$

$$T_{TIP} = T_C \cdot \prod_{i=1}^Q \left( T_Y(\omega_i) \cdot T_Z\left(\frac{\alpha'_i}{2}\right) \cdot T_{ZLin}(H_i(\alpha'_i)) \cdot T_Z\left(\frac{\alpha'_i}{2}\right) \right), \quad (2.6)$$

Где

$$\alpha'_i \in (0; \alpha_i), \quad (2.7)$$

Причем значение  $R_i$ , определяемое по формуле (2.4), является постоянным для всех  $\alpha'_i$ .

## 2.2 Обратная кинематика

### 2.2.1 Обратная кинематика для одной секции

Расчет обратной кинематики для одной секции в подходе с постоянной кривой сводится к нахождению центрального угла (угла изгиба)  $\alpha_i$  дуги  $S_i$  и угла поворота  $\omega_i$  при заданных начальной  $P_{i-1}$  и конечной (целевой)  $P_i$  точках в СК  $V_i$ . При этом, важно проверить, что длины дуги  $S_i$ , состоящей из  $N_i$  сегментов длиной  $L$ , хватает для достижения заданной точки при полученном угле  $\alpha_i$ .

Алгоритм получает данные согласно таблице 2.2. На выходе получаются угол изгиба  $\alpha_i$  и угол поворота  $\omega_i$  для секции  $i$ .

Таблица 2.2. Входные данные для обратной кинематики одной секции:

Количество сегментов в секции	$N$
Длина сегмента	$L$
Координаты начала секции	$P_{i-1}$
Координаты конца секции	$P_i$
СК катетера	$V_i$

Точки  $P_{i-1}$  и  $P_i$  образуют вектор хорды  $\overline{H_i}$  секции  $i$  (рисунок 2.3).

$$\overline{H_i} = \overline{P_{i-1}P_i}, \quad (2.8)$$

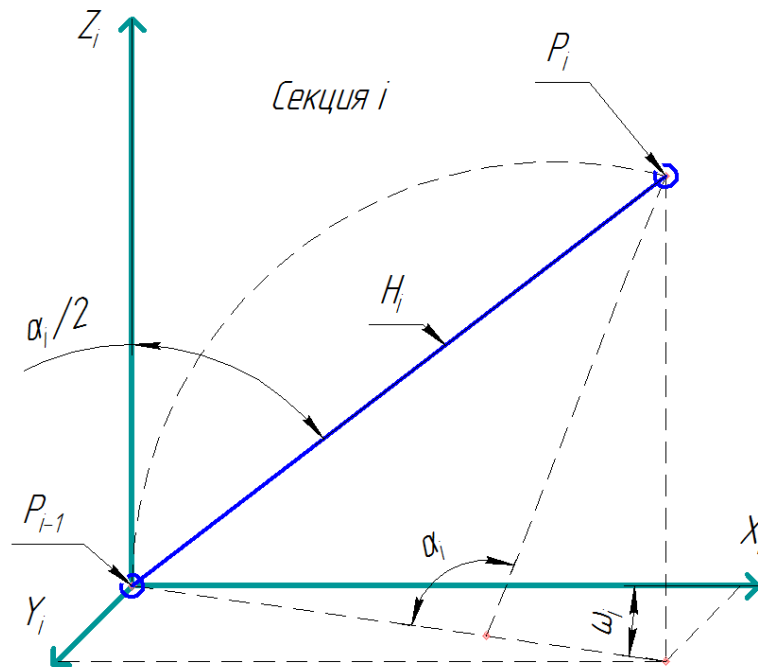


Рисунок 2.3. Обратная кинематика для одной секции

Угол изгиба  $\alpha_i$  определяется как через угол между вектором хорды  $\overline{H_i}$  и осью  $\overline{Z_i}$ :

$$\alpha_i = 2 \cdot \arccos \left( \frac{\overline{Z_i} \times \overline{H_i}}{|\overline{Z_i}| \cdot |\overline{H_i}|} \right), \quad (2.9)$$

Для проверки достижимости точки  $P_i$  сравниваются длина хорды  $H_i$ , образованная отрезком  $P_{i-1}P_i$ , и длина хорды  $H_i'$ , полученная из выражений (2.3), (2.4) и (2.5) для найденного угла изгиба  $\alpha_i$ .

$$H_i' = \frac{L \cdot (N_i - 1)}{\alpha_i} \sin \alpha_i, \quad (2.10)$$

Точка считается достижимой, если длины хорд  $H_i$  и  $H_i'$  равны.

Угол изгиба  $\omega_i$  определяется исходя из  $X$  и  $Y$  координат точки  $P_i$  в СК  $V_i$ :

$$\omega_i = \arctan2(\bar{P}_i'^X, \bar{P}_i'^Y), \quad (2.11)$$

Где  $\bar{P}_i'^X$  и  $\bar{P}_i'^Y$  –  $X$  и  $Y$  компоненты координаты точки  $P_i'$  в СК  $V_i$ .

Где  $P_i'$  в СК  $V_i$  – координата точки  $P_i$  в СК  $V_i$ :

$$P_i' = V_i^{-1} \cdot (P_i - P_{i-1}), \quad (2.12)$$

### 2.2.2 Обратная кинематика для нескольких секций

На данный момент существует аналитический метод решения задачи обратной кинематики для непрерывного робота с несколькими секциями [4]. Однако он не способен контролировать ориентацию кончика робота и не учитывает возможность совершения роботом линейных перемещений. В данной работе представлено решение задачи обратной кинематики с помощью эвристического алгоритма FABRIK [22].

Алгоритм FABRIK предназначен для работы с жесткими стержнями на шарнирах, тогда как катетер представляет непрерывную гибкую структуру. Подход на основе постоянной кривой дает возможность представить каждую дугу  $S_i$  секции изгиба  $i$  как хорду  $H_i$ , длина которой зависит от угла  $\alpha_i$ . Поскольку хорды  $H_i$  только соединяют начало  $P_{i-1}$  и конец  $P_i$  секции, то их взаимное расположение может быть любым. Это дает возможность представить катетер как цепь из жестких стержней переменной длины  $H_i(\alpha_i)$ , соединенных между собой шарнирами (рисунок 2.4a).

Для алгоритма FABRIK требуется, чтобы как минимум одна точка (база) была неподвижна. В кинематической модели также требуется обеспечить линейное перемещение катетера, поэтому начальная точка катетера  $P_0$  не может

быть стационарной. Для обеспечения линейного перемещения катетера, точка  $P_0$  была представлена как ползун и добавлен узел  $P_B$ , являющийся базой. Отрезок ползуна  $H_0$ , начинающийся в точке  $P_0$  и заканчивающийся в точке  $P_B$ , является жестким стержнем переменной длины, т.к. у точки  $P_0$  есть возможность свободно перемещаться в пределах отрезка хода  $l$ . Также следует отметить, что отрезок хода  $l$  и отрезок ползуна  $H_0$  лежат на оси  $\overline{Z_1}$  (рисунок 2.4а).

Обратная кинематика ищет конфигурацию из углов изгиба  $\alpha$ , углов поворота  $\omega$  и позиции ползуна  $P_0$ , такую, чтобы координата кончика катетера  $P_Q$  и вектор его ориентации  $\overline{Z_{Q+1}}$  соответствовали целевой точке  $t$  и вектору ориентации  $\overline{O}$  в пределах линейного и углового допусков  $TL$  и  $TA$ .

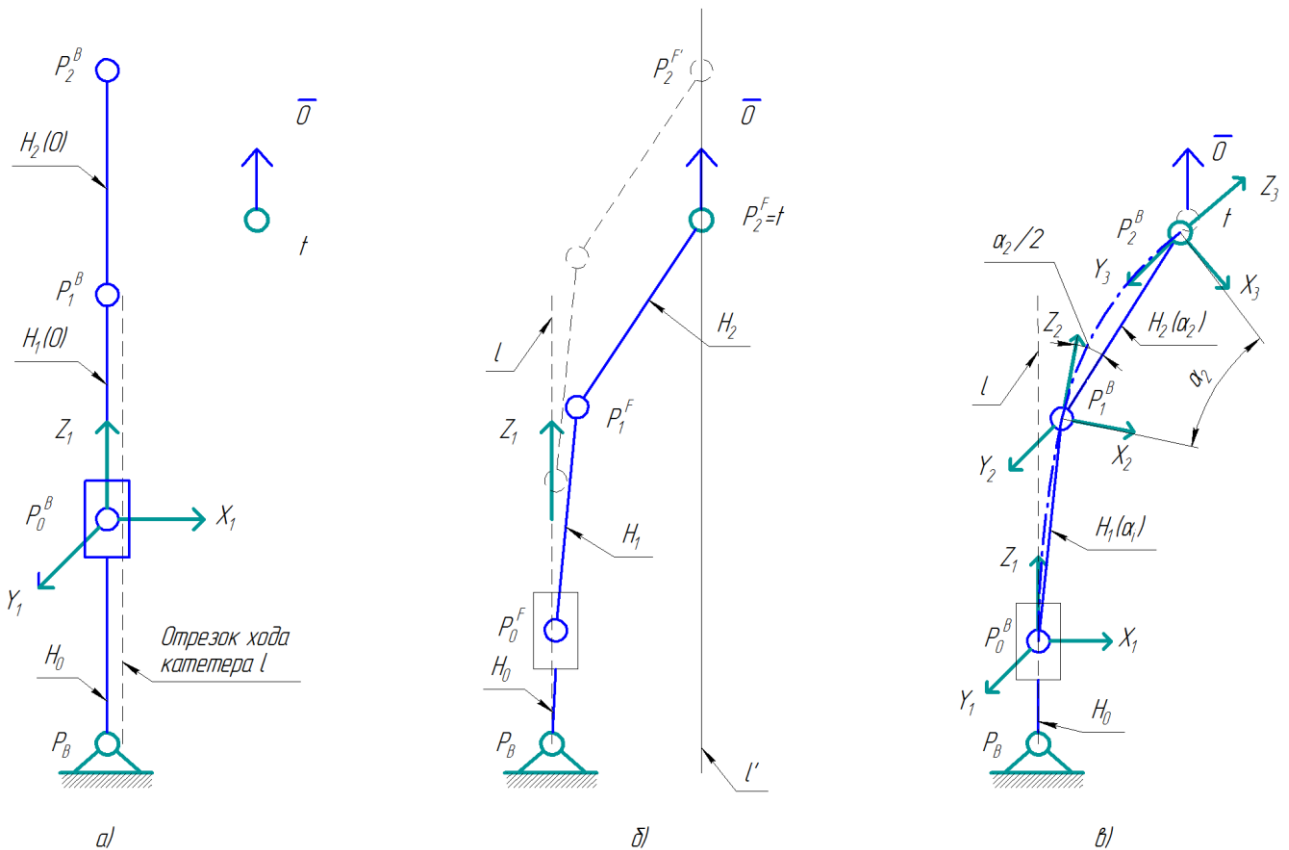


Рисунок 2.4. а) Начальное положение звеньев для катетера с двумя секциями для алгоритма FABRIK. Обе секции катетера не согнуты. б) Положение узлов в результате прямого следования в) Положение узлов катетера в результате обратного следования



Входными данными для обратной кинематики на основе алгоритма FABRIK являются (таблица 2.3):

Целевая точка  $t$  – точка, в которую должен прийти кончик катетера.

Вектор ориентации  $\bar{O}$  – вектор, которому должен соответствовать кончик катетера. Вектор ориентации  $\bar{O}$  может быть нулевым, тогда алгоритм будет

$TL$  и  $TA$  – линейный и угловой допуски алгоритма, достигнув которые алгоритм считает, что целевая точка  $t$  и вектор ориентации  $\bar{O}$  достигнуты и прекращает работу.

Точка начала катетера  $P_0$  – определяет начальное положение катетера. Она является ползуном и способна перемещается только по отрезку хода  $l$ .

$$P_0 \in l, \quad (2.13)$$

$l$  – отрезок, лежащий на оси  $\bar{Z}_1$ , в пределах которого может перемещаться ползун  $P_0$ . Его длина  $|l|$  определяет возможности линейных перемещений.

$V_1$  – СК катетера и первой секции. Определяет ориентацию катетера в глобальной СК.

Узел  $P_B$  является неподвижной базой для алгоритма FABRIK. Его положение может быть любым.

Количество секций в катетере  $Q$  определяет количество узловых точек  $P$ . Количество узловых точек равно  $Q + 2$  (учитывают начальная точка  $P_0$  и база  $P_B$ ).

Количество сегментов в секции  $N_i$  и их длина  $L$  нужны для определения хорд  $H_i$  секций катетера.

Таблица 2.3. Входные данные для обратной кинематики нескольких секций изгиба с возможностью линейного перемещения:

Количество секций в катетере	$Q$
Количество сегментов в секции	$N$
Длина сегмента	$L$
Координаты начала катетера	$P_0$
СК катетера	$V_1$
Отрезок хода	$l$
Целевая точка	$t$
Вектор ориентации	$\bar{O}$
Линейный допуск	$TL$
Угловой допуск	$TA$

На выходе алгоритм выдает набор углов изгиба  $\alpha$ , углов поворота  $\omega$  и значение линейного перемещения  $A$ , такие, что выстроенная по ним конфигурация соответствует условию:

$$\begin{cases} \Delta t < TL \\ \Delta O < TA' \end{cases} \quad (2.14)$$

Где  $\Delta t$  – расстояние, между целевой точкой  $t$  и кончиком катетера  $P_Q^B$ , рассчитанным алгоритмом:

$$\Delta t = P_Q^B t, \quad (2.15)$$

Где  $\Delta O$  – угол, между вектором ориентации  $\bar{O}$  и вектором кончика  $\overline{Z_{Q+1}}$ , рассчитанным алгоритмом:

$$\Delta O = \angle(\bar{O}, \overline{Z_{Q+1}}), \quad (2.16)$$

### 2.2.3 Описание работы алгоритма

Начальное положение катетера принято. Через прямую кинематику (раздел 2.1) определяются начальные узловые точки  $P_i$  для катетера с углами

поворота  $\omega = 0$  и углами изгиба  $\alpha = 0$  (рисунок 2.3а). Определяются длины хорд:

$$H_i = P_{i-1}P_i, \quad (2.17)$$

Начальные узловые точки приняты как результат обратного следования:

$$P_i^B = P_i, \quad (2.18)$$

Здесь и далее верхний индекс  $B$  обозначает узел, полученный в результате обратного следования, а верхний индекс  $F$  узел, полученный в результате прямого следования.

Расчет положения звеньев происходит в 3 этапа:

1. Прямое следование (рисунок 2.4б):

Расчет производится обходом из конечной точки  $P_Q^B$  в начальную  $P_0^F$  с подстройкой угла между хордами на каждом этапе. В результате получается новая конфигурация  $P^F$ .

а) Точка  $P_Q^B$  проецируется на прямую  $l'$  в точку  $P_Q^{F'}$ . Прямая  $l'$  параллельна оси  $\overline{Z_1}$  и проходит через точку  $t$ .

$$P_Q^{F'} = (t^X; t^Y; P_Q^{BZ}), \quad (2.19)$$

Данный этап необходим для получения минимальных углов изгиба катетера – достигая прямой  $l'$ , катетер совершает минимально возможный изгиб, а несовпадение по  $Z$  координате будет компенсироваться путем его линейного перемещения. Без этого этапа алгоритм будет в первую очередь достигать нужной точки за счет изгиба с минимальным линейным перемещением (рисунок 2.5).

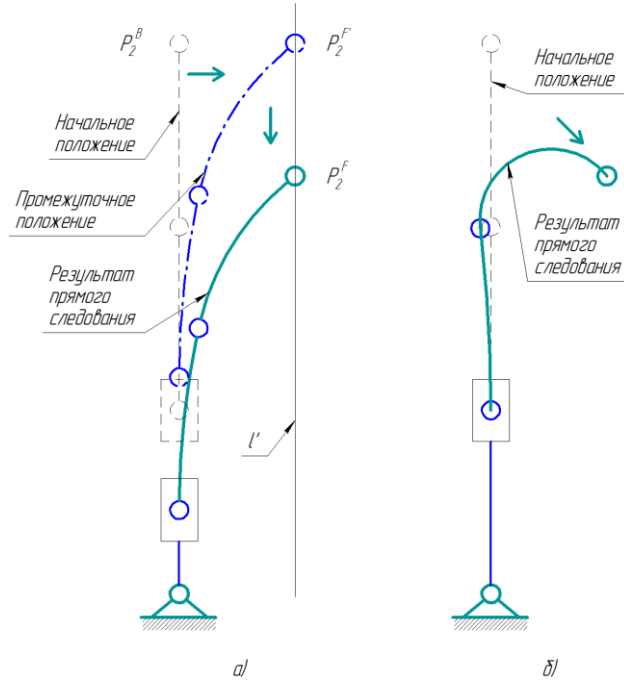


Рисунок 2.5. Результат прямого следования: а) с промежуточной стадией; б) напрямую

б) Дальнейший расчет узлов происходит по правилам алгоритма FABRIK для жестких стержней на шарнирах. Результатом является промежуточная конфигурация, состоящая из узлов  $P^{F'}$ .

$$r_i = P_{i+1}^{F'} P_i^B, \quad (2.20)$$

$$\lambda_i = H_{i+1}/r_i, \quad (2.21)$$

$$P_i^{F'} = (1 - \lambda_i) \cdot P_{i+1}^{F'} + \lambda_i \cdot P_i^B, \quad (2.22)$$

Где

$$i \in \{0, \dots, Q - 1\}, \quad (2.23)$$

Узел  $P_B$  остается неизменным на протяжении всей работы алгоритма.

в) Затем производится линейное смещение всех промежуточных узлов  $P_i^{F'}$  катетера по оси  $\overline{Z_1}$  для совпадения узла  $P_Q^{F'}$  с точкой  $t$ :

$$P^F = P^{F'} - P_Q^{F'} + t_Z, \quad (2.24)$$

## 2. Обратное следование (рисунок 2.4в):

Расчет производится обходом из начальной точки  $P_0^F$  в конечную  $P_Q^F$  с получением новой конфигурации  $P^B$ .

а) Расчет положения ползуна. Поскольку ползун  $P_0^B$  должен лежать на отрезке хода  $l$ , то:

$$P_0^B = [P_B^{FX}; P_B^{FY}; P_0^{BZ}], \quad (2.25)$$

Где

$$\begin{cases} P_0^{BZ} = l_{max}^Z, & P_0^{FZ} > l_{max} \\ P_0^{BZ} = P_0^{FZ}, & l_{min} \leq P_0^{FZ} \leq l_{max}, \\ P_0^{BZ} = l_{min}^Z, & P_0^{FZ} < l_{min} \end{cases} \quad (2.26)$$

Где  $l_{max}$  и  $l_{min}$  – предельные положения ползуна.

б) Для секции  $i \in \{1, \dots, Q\}$  через точки начала  $P_{i-1}^B$  и конца  $P_i^F$  секции, с помощью обратной кинематики для одной секции по формулам (2.9) и (2.11) определяются угол изгиба  $\alpha_i$  и угол поворота  $\omega_i$ . Угол  $\alpha_i$  также может быть ограничен по максимальному изгибу  $\alpha_i^{max}$ .

$$\alpha_i \leq \alpha_i^{max}, \quad (2.27)$$

Затем с использованием полученных значений по формуле (2.1) восстанавливается дуга, определяется СК секции  $V_{i+1}$  и значение  $P_i^B$ . Также обновляется длина хорды:

$$H_i = P_{i-1}^B P_i^B, \quad (2.28)$$

## 3. Проверка выполнения условия (2.14) и подстройка ориентации кончика катетера (рисунок 2.6):

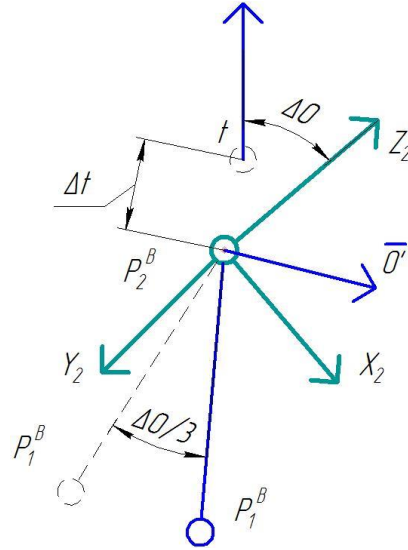


Рисунок 2.6. Подстройка ориентации кончика катетера

После того как определен узел  $P_Q^B$  производится проверка выполнения условия (2.18).

$\Delta t$  определяется по формуле (2.15).

Расчет  $\Delta O$  производится только, если задан ненулевой вектор  $\bar{O}$ :

$$\Delta O = \arccos \left( \frac{\overline{Z_{Q+1}} \times \bar{O}}{|\overline{Z_{Q+1}}| \cdot |\bar{O}|} \right), \quad \bar{O} \neq 0 \quad (2.29)$$

Если угловая разность  $\Delta O$  не входит в допуск, то требуется подстройка ориентации кончика катетера. Подстройка ориентации производится путем поворота отрезка  $P_{Q-1}^B P_Q^B$ , так, чтобы вектора  $\bar{O}$  и  $\overline{Z_{Q+1}}$  совпали. Для этого точку  $P_{Q-1}^B$  требуется повернуть на угол  $\Delta O/3$  вокруг вектора  $\bar{O}'$  с центром вращения в точке  $P_Q^B$ :

$$Q_P(P_{Q-1}^{B'}) = Q \left( \left( \frac{\Delta O}{2} \right), \bar{O}' \right) \cdot Q_P(P_{Q-1}^B - P_Q^B) \cdot Q \left( \left( \frac{\Delta O}{2} \right), \bar{O}' \right)^T, \quad (2.30)$$

$$P_{Q-1}^{B'} = P_{Q-1}^{B'} + P_Q^B, \quad (2.31)$$

Где  $Q$  – матрица кватерниона поворота вокруг оси  $\bar{O}'$  на угол  $\Delta O/2$ ,  $Q_P$  – матрица кватерниона точки,  $\bar{O}'$  вектор перпендикулярный векторам  $\bar{O}$  и  $\overline{Z_{Q+1}}$ :

$$\bar{O}' = \overline{Z_{Q+1}} \times \bar{O}, \quad (2.32)$$

Полученное новое значение  $P_{Q-1}^B$  будет использоваться в следующей итерации прямого следования.

Итерации продолжаются, пока не будет выполнено условие (2.18). Если условие (2.18) верно, то координаты кончика катетера и ориентация находятся в пределах допусков и алгоритм прекращает работу.

#### 2.2.4 Расчет смещения нитей

В данном разделе описаны расчеты, которые позволяют определить изменение перемещение тянущих нитей для того, чтобы катетер принял требуемую конфигурацию.

Известна конфигурация катетера, заданная углами изгиба  $\alpha$  и углами поворота  $\omega$ , длина каждой секции катетера  $S$  и радиус  $r$ , на котором расположено  $A$  нитей. Поскольку нити ограничены кольцами как оболочкой, то нити повторяют форму секции, смещенную на  $r$  и образуют дугу  $S'$  (рисунок 2.7).

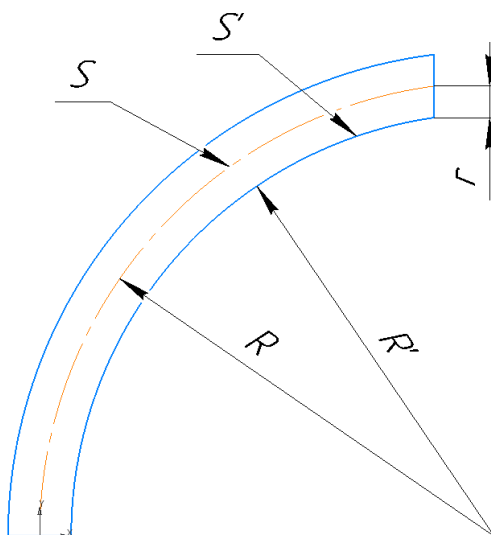


Рисунок 2.7. Нити секции

Центры и центральные углы  $\alpha$  дуг  $S$  и  $S'$  совпадают. Смещение нити  $\Delta S$  определяется как разница между длинами дуг  $S$  и  $S'$ .

$$\Delta S_i = S'_i - S_i = \alpha_i \cdot R' - \alpha_i \cdot R = \alpha_i \cdot r, \quad (2.33)$$

Поскольку нити расположены по окружности  $r$  равномерно, то изменение длин всех нитей  $j = [1..A]$ :

$$\Delta S_i^{(j)} = \Delta S_i \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (j - 1)}{A}\right), \quad (2.34)$$

Рассчитанные  $\Delta S_i^{(j)}$  являются смещением нитей, когда дуга первой нити лежит в плоскости изгиба. В случае, если секция совершила поворот на угол  $\omega$ , длины нитей определяются как:

$$\Delta S_i^{(j)} = \Delta S_i \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (j - 1)}{A} + \omega_i\right), \quad (2.35)$$

Смещение нитей для всего катетера  $\Delta S k^{(j)}$  получается сложением всех  $\Delta S^{(j)}$  через чьи секции проходит нить  $j$ .



### 3 Конструкторская часть

#### 3.1 Проектирование роботизированного катетера

##### 3.1.1 Составление технического задания

Для проведения эксперимента требуется спроектировать катетер с двумя секциями изгиба, способный сгибаться в любом направлении. Максимальный внешний диаметр с учетом оболочки не более 9 мм. Поскольку внутри катетера должны проходить элементы обеспечивающие работу медицинского инструмента на кончике, то катетер должен представлять собой трубку с внутренним диаметром не менее 3 мм.

##### 3.1.2 Описание конструкции катетера

В соответствии с техническим заданием был спроектирован катетер с двумя секциями изгиба (рисунки 3.1 и 3.2).

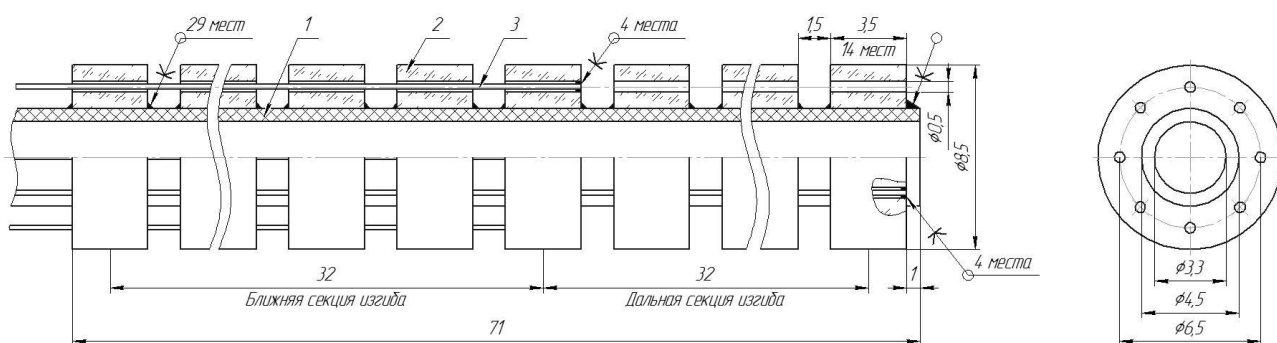


Рисунок 3.1. Чертеж катетер с тянущими нитями в сборке



Рисунок 3.2. Катетер

Основой катетера является гибкая ПВХ трубка 1 с внешним диаметром 4,5 мм и внутренним диаметром 3,3 мм. На трубку установлены жесткие кольца 2 с внешним диаметром 8,5 мм, внутренним и толщиной 3,5 мм (рис. 2). У колец имеется восемь отверстий диаметром 0,5 мм, равномерно распределенных на диаметре 6,5 мм. Через отверстия в кольцах проходят нити 3, которые управляют движением катетера. Нити, относящиеся к одной секции изгиба, расположены с шагом 90° друг от друга. На каждую секцию изгиба приходится по четыре тянущие нити – это позволяет обеспечить пространственный изгиб катетера. Нити фиксируются на последнем кольце секции склеиванием. Кольцо, на котором закреплена нить, определяет конец секции изгиба. В катетере, использованном в данной работе, есть два набора нитей по четыре нити в каждом. Первый набор проходит сквозь катетер до его середины. При стягивании этих нитей изгиб совершает только ближняя секция изгиба. Вторым набор нитей проходит через весь катетер. Вторым набором натянут слабее, чем первый для того, чтобы при его стягивании, изгиб совершала только вторая половина катетера. Кольца обеспечивают схожесть геометрии основы и нитей, также за кольца производится закрепление нитей. Кольца расположены на расстоянии 1,5 мм друг от друга. Поскольку кольца сделаны более жесткого материала, чем трубка, то изгиб совершается только в месте просветов. Просвет является гибким микромеханическим шарниром. Равенство параметров (геометрия, материал) просветов обеспечивает равномерное распределение нагрузок и, как следствие, равномерный изгиб на каждом шарнире. Катетер обеспечивает четыре степени свободы: по две на каждую секцию. Сзади на катетер устанавливается жесткая пружина сжатия, которая обеспечивает компенсацию натяжения нитей, потерянного за счет люфтов на шкивах двигателей. После пружины на катетер устанавливается жесткая втулка, внешним диаметром равная диаметру колец, для обеспечения жесткости неуправляемой части.

## **3.2 Проектирование стенда для испытаний**

### **3.2.1 Составление технического задания**

Для проведения эксперимента требуется спроектировать стенд. Стенд должен быть жестким, на нем должно быть крепление для установки катетера, возможность установки и регулировки положения и ориентации камер для обработки машинным зрением, место под блок питания и место под системы управления. Камеры должны быть установлены так, чтобы катетер все время находится в поле зрения камер.

### **3.2.2 Описание конструкции стенда**

В соответствии с техническим заданием был проектирован стенд (рис 3.2).

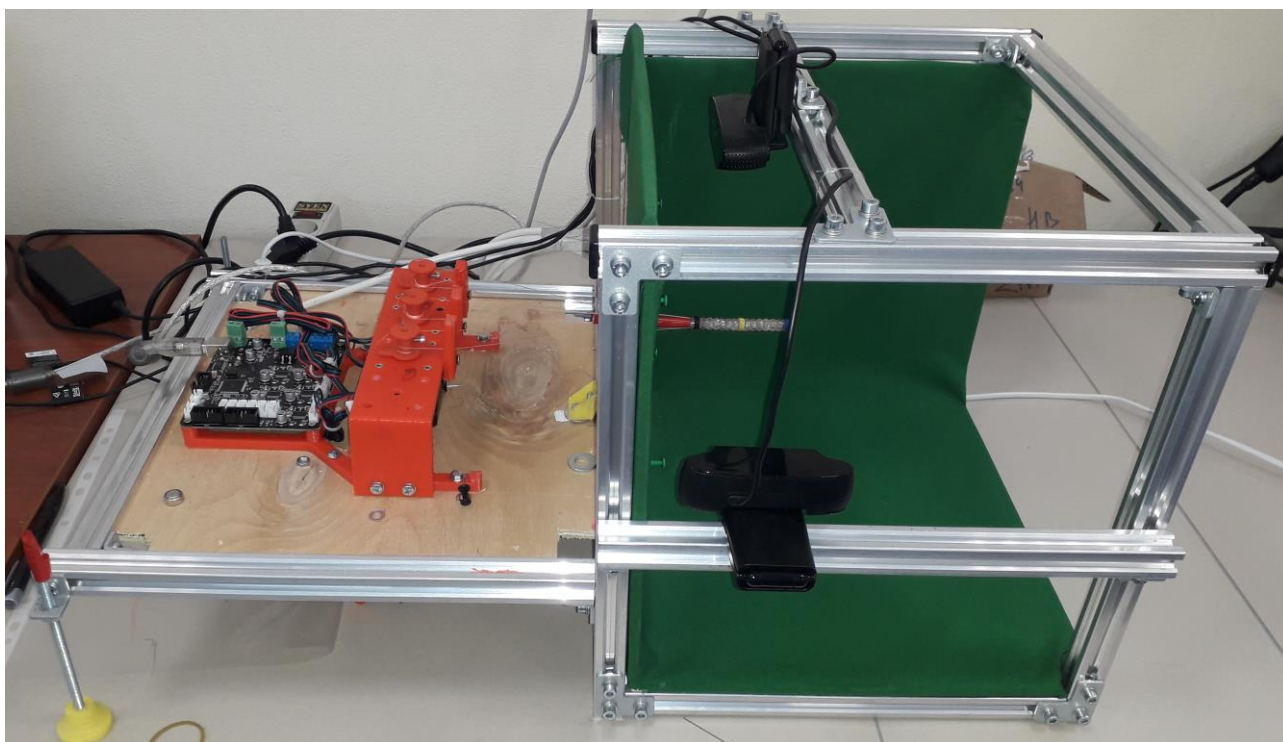


Рисунок 3.2. Стенд

Стенд представляет собой каркас из конструкционного алюминиевого профиля 4, 5 соединённого уголками 12, винтами 16 и гайками 17. На профиль установлены веб-камеры 21, положение которых можно регулировать. Конструкция каркаса спроектирована так, чтобы расстояние от веб-камер 21 до

катетера 1 было не менее 15 см. Это сделано для обеспечения возможности сфокусировать камеры на катетере. Напротив камер установлены нижняя стенка 7, боковая стенка 8 и, со стороны входа катетера 1, установлена задняя стенка 9. Стенки обтянуты зеленой тканью 22 для облегчения работы машинного зрения. Катетер 1 установлен в оправку 11 для обеспечения стабильности. Электроника 23, включающая с себя двигатели и их системы управления, установлена на панель 10. Катетер 1 и электроника 23 связаны между собой тянущими нитями, проходящими чрез восемь малых отверстий в оправке 11. Панель 10 на которой, установлена электроника 23 можно регулировать по высоте с помощью штанга с резьбой 13.

Сборочный чертеж стенда представлен в приложении Б, а спецификация к нему представлена в приложении В.

### **3.3 Разработка технологии сборки стенда**

Последовательность общей сборки изделия в основном определяется его конструктивными особенностями и принятыми методами достижения требуемой точности, а поэтому не может быть произвольной. На этом этапе важно правильно выделить в изделии сборочные единицы соответствующего порядка, которые характеризуются независимостью и законченностью сборки, а при транспортировании по рабочим местам сборки не распадаются на отдельные детали.

Схема сборки представлена в приложении Г.

#### **3.3.1 Маршрутный лист**

Технологическая карта сборки стенда представлена в таблице 3.1

Таблица 3.1. Маршрут технологического процесса сборки

№ операции	Наименование операции	Содержание операции и переходов
005	Сборка стенда	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Соединить два профиля 4 и два профиля 5 уголками 12, винтами 16 и гайками 17, так чтобы профили 5 находились между профилями 4.</li> <li>2. Установить вертикально четыре профиля 4, нижнюю стенку 7, боковую стенку 8, заднюю стенку 9 и соединить их уголками 12, винтами 16 и гайками 17.</li> <li>3. Установить горизонтально три профиля 4 на вертикальных профилях 4 и закрепить их уголками 12, винтами 16 и гайками 17.</li> <li>4. Вставить в профиль 4 две гайки 17 в паз и установить его горизонтально 4 за задней стенкой 9 между вертикальными профилями, так чтобы паз с гайками был направлен вверх, и закрепить уголками 12, винтами 16 и гайками 17.</li> <li>5. Закрепить на профиле 4, установленном в переходе 4, оправку 11 двумя уголками 12, винтами 16 и гайками 17, вставными в паз профиля 4 в переходе 4.</li> <li>6. Закрепить горизонтально два профиля 4 на вертикальных профилях, задействованных в переходе 4, уголками 12, винтами 16 и гайками 17.</li> <li>7. Выровнять профили 4 из переходов 4 и 6 и вставить в их пазы панель 10.</li> <li>8. Закрыть панель 10 профилем 4 с и закрепить уголками 12, винтами 16 и гайками 17 на профилях 4 из перехода 6.</li> <li>9. Закрепить на профилях 4 из перехода 6 резьбовые штанги 13, уголками 12, винтами 16 и гайками 17.</li> <li>10. Установить на штанги 13 ножки 6.</li> <li>11. Закрепить на панели 10 электронику 23 винтами 16 и гайками 17.</li> <li>12. Оббить зеленой тканью 22 стенки 8, 9 и 10.</li> <li>13. Закрепить напротив стенок 8 и 9 два профиля 4 уголками 12, винтами 16, гайками 17 и шайбами 18.</li> <li>14. Закрепить на профилях 4 из перехода 13 веб-камеры 21 уголками 12, винтами 16 и гайками 17.</li> <li>15. Установить в оправку 11 катетер 1, продеть сквозь малые отверстия оправки 11 нити катетера.</li> </ol>

		16. Соединить катетер 1 и электронику 23.
010	Регулировочная	1. Отрегулировать положение панели 10. 2. Отрегулировать положение веб-камер 21. 3. Закрепить, исключив их перемещение. 4. Отрегулировать натяжение нитей.
015	Контрольная	1. Проверить надежность сборки

Схема сборки представлена в приложении Г в виде схемы деления структурной.

### 3.3.2 Нормирование технологического процесса сборки

Применительно к единичному производству принимаем нормативы согласно [23]:

- Установка гаек в пазы профилей, профилей, уголков, стенок, панели, оправки: карта 64 -  $t_1 = (15 + 7 + 34 + 62) \cdot 0,135 = 15,93$  мин;
- Установка катетера в оправку: карта 57 -  $t_2 = 0,18$  мин;
- Завинчивание винтов отверткой: карта 87 -  $t_3 = 66 \cdot 0,2 = 13,2$  мин;
- Установка электроники и веб-камер с совмещением отверстий: карта 127 -  $t_4 = 3 \cdot 0,14 = 0,42$  мин;
- Закручивание гаек и ножек: карта 137 -  $t_5 = (8 + 2) \cdot 0,24 = 2,4$  мин;
- Регулировка положения панели принята как  $t_6 = 10$  мин;
- Регулировка положения камер принята как  $t_7 = 100$  мин;
- Регулировка положения камер принята как  $t_8 = 100$  мин;

Операционное время:

$$T_{\text{оп}} = \sum t_i = 15,93 + 0,18 + 13,2 + 0,42 + 2,4 + 10 + 100 + 100 =$$

$$= 242,13 \text{ мин.}$$

Штучно-калькуляционное время в условиях мелкосерийного и единичного производства:

$$T_{\text{шк}} = T_{\text{оп}} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha_{\text{пз}} + \alpha_{\text{об}} + \alpha_{\text{отл}}}{100} \right) \cdot K_1 \cdot K_2;$$

Где  $\alpha_{\text{пз}} = 2\%$  – процент подготовительно-заключительного времени;

$\alpha_{\text{об}} = 3,5\%$  – процент на обслуживание рабочего места;

$\alpha_{\text{отл}} = 6\%$  – процент на отдых и личные потребности;

$K_1 = 1$  – отношение планируемого выпуска изделий в месяц к нормативному;

$K_2 = 1$  – работа в положении «удобно» (карта 5).

Штучно-калькуляционное время:

$$T_{\text{шк}} = 242,13 \cdot \left( 1 + \frac{2 + 3,5 + 6}{100} \right) \cdot 1 \cdot 1 = 269,97 \text{ мин.}$$

## **4 Результаты**

### **4.1 Подготовка к эксперименту**

Для машинного зрения, выполняемого с помощью камер, свойственны две проблемы:

1) Камеры невозможно выставить так, чтобы они лежали под углом  $90^\circ$  друг к другу и сходились в одной точке. Это приводит к тому, что системы координат у камер разные и построить единую систему координат вручную не представляется возможным.

2) Эффект перспективы камеры искажает изображение. В результате чего масштаб изображения не постоянен и изменяется от центра к краям изображения.

Для этого чтобы исключить эти проблемы перед началом эксперимента камеры были откалиброваны. Получившийся набор параметров позволяет по двух изображениям определить точку в пространстве с погрешность в 0,67 мм.

### **4.2 Эксперимент**

Эксперимент был построен следующим образом:

1) Катетер принимает случайную конфигурацию.

На систему управления передаются случайные значения для наматывания/разматывания нитей из-за чего катетер принимает случайную конфигурацию (рисунок 4.1).





Рисунок 4.1. Изображение согнутого катетера. Справа - вид сбоку. Слева – вид сверху.

В данной работе использовались 23 случайных конфигурации.

- 2) Определяются действительная промежуточная точка, конечная точка и её вектор ориентации.

Параметры конфигурации катетера определяются исходя из изображения полученного камерами (рисунок 4.1). На катетере присутствуют три метки – черная, желтая и синяя, которые определяют начальную точку, промежуточную точку и точку конца катетера соответственно.

Координаты точек размечаются вручную (рисунок 4.2). Точки, являющиеся геометрическим центром меток, определяют положение катетера в пространстве. Также размечается точка на самом конце синей метки для определения ориентации кончика катетера – точка ориентации.

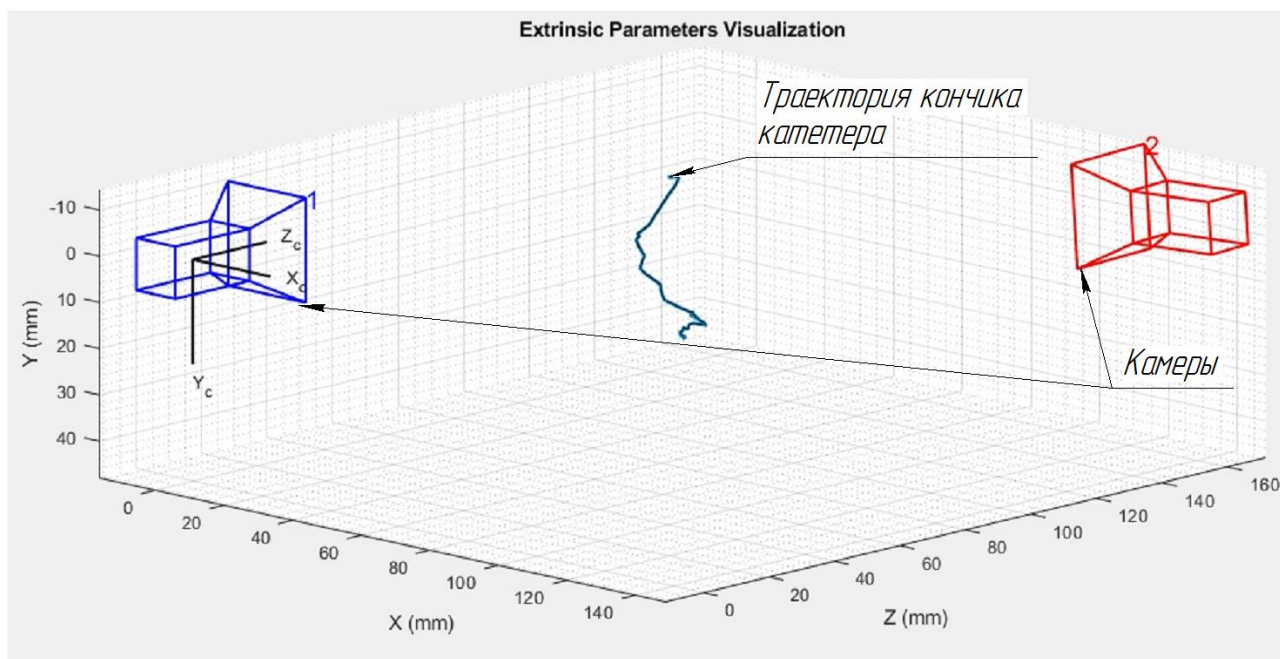


Рисунок 4.2. Траектория катетера в пространстве

Из рисунка 4.2 видно, что камеры не сходятся в одной точке и не находятся под углом  $90^\circ$  друг к другу. Однако алгоритм калибровки определяет их взаимное расположение и позволяет исключить эти погрешности.

Следует отметить низкую точность разметки из-за невозможности попасть точно в центр метки и кончик катетера.

- 3) Действительные начальная и конечная точки и вектор ориентации вводятся в алгоритм обратной кинематики.

На основе этих данных выводятся расчетная координата конечной точки, ориентация и конфигурация. Алгоритм настроен на максимально высокую внутреннюю точность:  $TL = 1$  мкм и  $TA = 10^{-3}^\circ$ .

- 4) Сравниваются действительная и расчетная промежуточная точка, конечная точка, линейное перемещение и вектор ориентации.

Погрешность на промежуточной точке показывает насколько действительная конфигурация совпадает с расчетной. Погрешность на конечной точке показывает линейную точность алгоритма. Поскольку катетер совершает

линейные перемещения за счет сжатия пружины, то погрешность линейных перемещений входит в линейную погрешность алгоритма. Угловая разность между расчетным и действительным вектором ориентации показывает угловую точность алгоритма.

На рисунке 4.3 представлены абсолютная погрешность для промежуточной точки и конечной точек с нулевым вектором ориентации и отсутствием линейных перемещений.

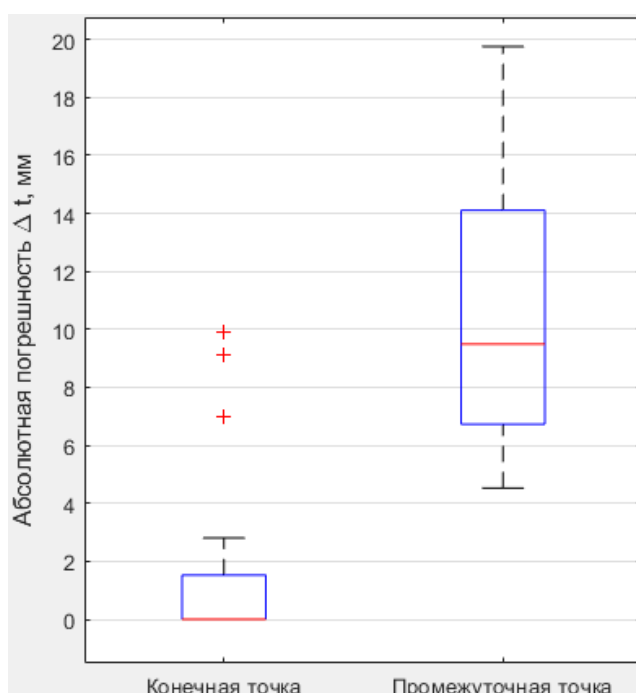


Рисунок 4.3. Абсолютная погрешность для промежуточной точки и конечной точек с нулевым вектором ориентации и отсутствием линейных перемещений.

На рисунке 4.3 присутствуют три точки выброса, являющиеся следствием низкой точности ручной разметки. Большие погрешности на промежуточной точке показывают, что алгоритм пришел в требуемые точки в иной конфигурации, чем та, что была задана изначально. Совпадение медианы с минимумом показывает, что алгоритм в более чем половине случаев приходит в точку для заданной точности.

Максимальная погрешность алгоритма 2,8 мм. Средняя погрешность без учета выбросов 0,42 мм.

На рисунке 4.4 представлены абсолютная погрешность для промежуточной точки и конечной точек с ненулевым вектором ориентации и отсутствием линейных перемещений.

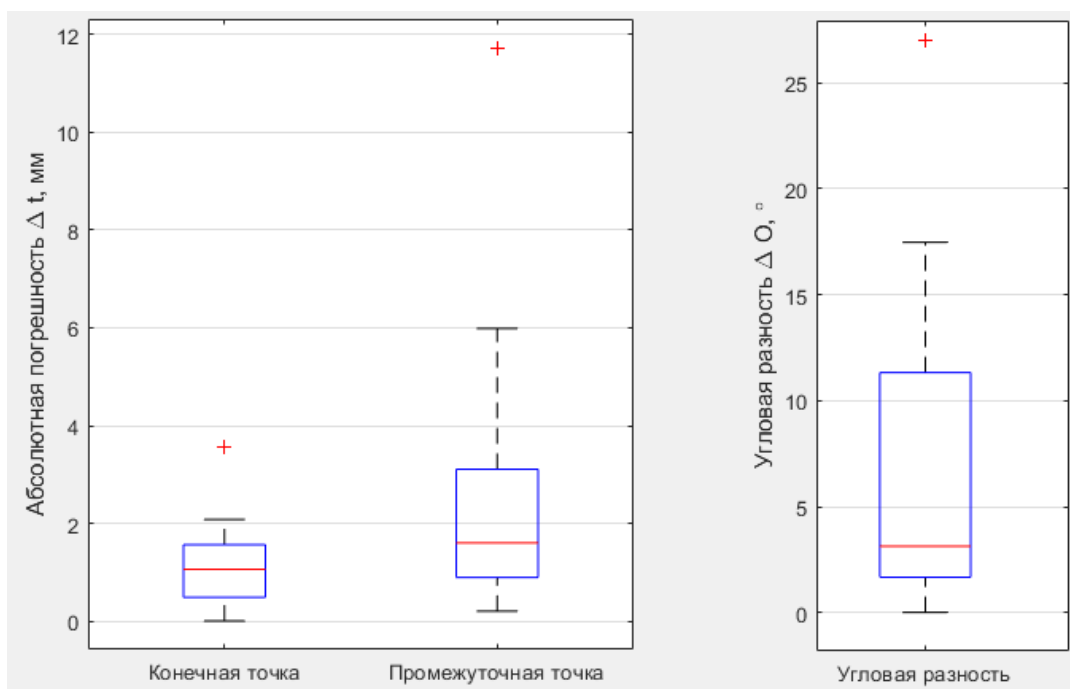


Рисунок 4.4. Абсолютная погрешность для промежуточной точки и конечной точек с ненулевым вектором ориентации и отсутствием линейных перемещений.

На рисунке 4.4 присутствует точка выброса, являющиеся следствием низкой точности ручной разметки. Погрешности промежуточной точки меньше, чем на рисунке 4.3 свидетельствуют о бóльшем совпадении расчетной и действительной конфигураций. Большой разброс угловой разности является результатом крайне низкой точности разметки.

Из результатов эксперимента следует, что линейная точность алгоритма составляет 0,42 мм при достижении точки без учета ориентации кончика и 1,1 мм с угловой точностью 3° с учетом ориентации кончика.

### 4.3 Выводы

На основе результатов, полученных в пункте 4.2, можно сделать вывод, что алгоритм применим для роботизированных катетеров, способных перемещаться линейно по своей оси, с двумя секциями изгиба. Линейная точность алгоритма составляет 0,42 мм при достижении точки без учета ориентации кончика и 1,1 мм с угловой точностью  $3^\circ$  с учетом ориентации кончика. Алгоритм выполняет задачу достижения точки без заданной ориентации кончика катетера эффективнее, чем задачу достижения точки с учетом ориентации кончика катетера. Катетер ведет себя согласно заложенным в него при конструировании характеристикам — он способен изгибаться в любом направлении за счет комбинирования натяжения нитей, изгиб происходит равномерно по всей длине секции и только на микромеханических шарнирах.

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ61	Колпащиков Д. Ю.

Школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	...
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	...
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	...

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	...
2. Разработка устава научно-технического проекта	...
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	...
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	...

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Хаперская А. В			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Колпащиков Д.Ю.		

## **5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Сегодня перспективность научного исследования определяется в первую очередь его коммерческой ценностью, нежели масштабом открытия, оценить которое на первых этапах бывает достаточно трудно. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Такая оценка помогает ученому найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только улучшением технических характеристик в сравнении с предыдущими разработками, но и тем насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

### **5.1 Предпроектный анализ**

На стадии предпроектного анализа будут определены основные показатели заинтересованности инвесторов и участников проекта. Данная часть позволяет выполнить предварительный анализ рисков. В предпроектном анализе рассмотрены потенциальные потребители результатов исследования, проанализированы конкурентные технические решения с позиции

ресурсоэффективности и ресурсосбережения, произведена оценка готовности проекта к коммерциализации и выбраны методы коммерциализации результатов.

Целью данной научно-исследовательской работы является исследование закономерностей движения роботизированного катетера с двумя секциями изгиба. Это необходимо для точного управления и позиционирования роботизированного катетера.

Работа выполнялась лабораторией Дизайна Медицинских Изделий в рамках государственного задания Наука. В лаборатории были разработаны роботизированный катетер, стенд для испытаний, алгоритмы прямой и обратной кинематики катетера и проведена их экспериментальная проверка.

Участие магистранта заключалось в сборе информации о возможных технологических решениях при проектировании катетера, разработка алгоритмов прямой и обратной кинематики, а также проверки их работоспособности.

Конечными потребителями данного проекта медицинские учреждения, проводящие катетерные процедуры. Результаты работы не ограничиваются применением в медицинской технике и также могут быть использованы в иных областях: машиностроение, подводная робототехника, системах диагностики и т.д.

## **5.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.



Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 5.1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Конкурент 1 – ручные катетеры.

Конкурент 2 – роботизированный катетер, управляемый вручную.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum (B_i \cdot B_i), \quad (5.1)$$

Где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента,  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы),  $B_i$  – балл показателя.

Таблица 5.1. Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений:

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкуренто-способность		
		Б <sub>Ф</sub>	Б <sub>К1</sub>	Б <sub>К2</sub>	К <sub>Ф</sub>	К <sub>К1</sub>	К <sub>К2</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,08	5	1	4	0,4	0,08	0,32
2. Удобство в эксплуатации	0,06	5	3	4	0,3	0,18	0,24
3. Энергоэкономичность	0,02	1	5	1	0,02	0,1	0,02
4. Надежность	0,08	4	5	4	0,32	0,4	0,32
5. Безопасность	0,08	4	5	5	0,32	0,4	0,4

6. Потребность в ресурсах памяти	0,04	3	5	4	0,12	0,2	0,16
7. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,07	5	2	4	0,35	0,14	0,28
8. Простота эксплуатации	0,06	5	3	4	0,3	0,18	0,24
9. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	5	1	5	0,2	0,04	0,2
10. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,04	5	1	5	0,2	0,04	0,2
<b>Экономические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
2. Уровень проникновения на рынок	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
3. Цена	0,07	2	5	2	0,14	0,35	0,14
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	1	5	0,3	0,06	0,3
5. Послепродажное обслуживание	0,02	2	5	2	0,04	0,1	0,04
6. Финансирование научной разработки	0,06	2	5	2	0,12	0,3	0,12
7. Срок выхода на рынок	0,04	2	3	2	0,08	0,12	0,08
8. Наличие сертификации разработки	0,06	3	4	3	0,18	0,24	0,18
<b>ИТОГО</b>	<b>1</b>	<b>66</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>3,87</b>	<b>3,41</b>	<b>3,72</b>

Из таблицы 5.1 видно, что такие преимущества разработки как повышенная производительности, надежность и безопасность делают её конкурентоспособной.

### 5.3 FAST-анализ

FAST-анализ - функционально-стоимостный анализ. Суть этого метода базируется на том, что затраты, связанные с созданием и использованием любого

объекта, выполняющего заданные функции, состоят из необходимых для его изготовления и эксплуатации и дополнительных, функционально неоправданных, излишних затрат, которые возникают из-за введения ненужных функций, не имеющих прямого отношения к назначению объекта, или связаны с несовершенством конструкции, технологических процессов, применяемых материалов, методов организации труда и т.д.

В качестве объекта FAST-анализа выступает роботизированный катетер. Описание главной, основных, и вспомогательных функций представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Описание главной, основных, и вспомогательных функций:

Наименование детали	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Роботизированный катетер	-	Перемещение внутри полостей тела	X		
ПВХ трубка	1	Основа для катетера		X	
Леска	8	Управление секциями изгиба катетера		X	
Кольца	15	Оболочки для лесок		X	
		Жесткие сегменты			X

Для оценки значимости функций используется метод расстановки приоритетов. Для него функции распределяются по приоритетам, и составляется матрица количественных соотношений функций – таблица 5.3.

Таблица 5.3. Матрица количественных соотношений:

	Основа для катетера	Управление двумя секциями изгиба катетера	Оболочки для лесок	Жесткие сегменты	Итого
Основа для катетера	1	0,5	1,5	1,5	4,5
Управление секциями изгиба катетера	1,5	1	1,5	1,5	5,5
Оболочки для лесок	0,5	0,5	1	1,5	3,5
Жесткие сегменты	0,5	0,5	0,5	1	2,5
					16

Относительная значимость каждой функции:

Основа для катетера:  $4,5/16 = 0,28$ ;

Управление секциями изгиба катетера:  $5,5/16 = 0,34$ ;

Оболочки для лесок:  $3,5/16 = 0,22$ ;

Жесткие сегменты:  $2,5/16 = 0,16$ ;

Расчет стоимости функций приведен в таблице 5.4

Таблица 5.4. Расчет стоимости функций:

Наименование детали	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Трудоемкость, норм-ч.	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Роботизированный катетер	-	Перемещение внутри полостей тела	-	-	-	-
ПВХ трубка	1	Основа для катетера	0,02	35	4,58	39,58

Леска	8	Управление секциями изгиба катетера	2	330	457,54	787,54
Кольца	15	Оболочки для лесок	4	112,5	915,08	1027,58
		Жесткие сегменты				
Итого						1854,7

Определим относительные затраты на функцию:

Основа для катетера:  $39,58/1854,7 = 0,03$ ;

Управление секциями изгиба катетера:  $787,54/1854,7 = 0,42$ ;

Оболочки для лесок и жесткие сегменты:  $1027,58/1854,7 = 0,55$ ;

Информация об объекте исследования, собранная в рамках предыдущих стадий, на данном этапе обобщается в виде функционально-стоимостной диаграммы (рисунок 5.1)

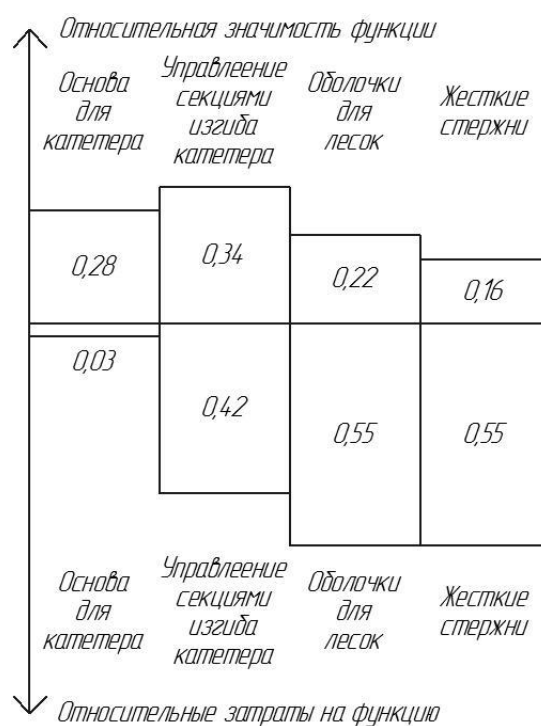


Рисунок 5.1. Функционально-стоимостная диаграмма

Согласно вышеприведенной диаграмме, видно рассогласование по 3 и 4 функциям. Для оптимизации функций можно предложить следующие шаги:

- применения новых конструкторских решений;
- применения более дешевых техпроцессов, заготовок и материалов;

### 5.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Таблица 5.5. SWOT-анализ:

	Сильные стороны: С1 Более высокая производительность. С2. Более высокая точность. С3. Высокая квалификация сотрудников. С4. Наличие производственной базы.	Слабые стороны: Сл1. Слабое финансирование Сл2. Необходимость экспериментов in vivo.
Возможности: В1. Высокая потребность в лечении ССЗ. В2. Возможность применения технологий в других областях.	1) Уменьшение смертности от ССЗ. 2) Улучшение качества лечения ССЗ. 3) Применение разработок в других сферах.	1) Поиск нового источника финансирования заинтересованного в непрерывных работах. 2) Испытание разработок в других областях или ex vivo.
Угрозы: У1. Уменьшение финансирования. У2. Появление новых технологий позиционирования катетера У3. Появление новых способов лечения ССЗ	1) Самостоятельное производство оборудования 2) Продвигать как замена для традиционных манипуляторов.	1) Показывать эффективность разработок, чтобы не уменьшали финансирование. 2) Увеличивать заинтересованность в разработке. 3) Искать применение в других областях.

## 5.4 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, влияя на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

### 5.4.1 Цели и результат проекта

Информация по заинтересованным сторонам проекта предоставлена в таблице 5.6. Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта.

Таблица 5.6. Заинтересованные стороны проекта:

Заинтересованные стороны проекты	Ожидания заинтересованных сторон
Магистрант	Магистерская диссертация
Руководитель проекта	Роботизированный катетер и зависимости для его управления

Реализация любого проекта преследует какую-либо определенную цель. Неправильно определенные цели и задачи, или цели без задач, приводят к тому, что в процессе реализации проекта возникают перерасход средств, конфликты между членами проектной команды, несоблюдение контрольных промежуточных пунктов и, как следствие, недовольство доноров проекта. Цель

в большей степени представляет собой декларацию о намерениях, из которой должно быть ясно, в чем состоит важность проекта для общества. Цели и результаты проекта предоставлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7. Цели и результат проекта:

Цель проекта:	Исследовать закономерности движения роботизированного катетера с двумя секциями изгиба.
Ожидаемые результаты проекта:	1. Магистерская диссертация. 2. Алгоритмы для управления катетером. 3. Роботизированный катетер.
Требования к результату проекта:	1. Работоспособность. 2. Новизна предложенных алгоритмов

#### 5.4.2 Организационная структура проекта

В данном разделе в таблице 5.8 представлена рабочая группа проекта и описаны функции каждого участника.

Таблица 5.8. Рабочая группа проекта:

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час
Арляпов А.Ю., НИ ТПУ, доцент ИШПРТ	Руководитель, эксперт	Консультирование по конструированию	160
Колпащиков Д.Ю., НИ ТПУ, магистрант	Исполнитель	1. Расчет алгоритмов 2. Проведение экспериментов 3. Разработка конструкции стенда и роботизированного катетера	1680
Итого:			1840



### 5.4.3 Ограничения и допущения проекта

В таблице 5.9 представлены ограничения проекта. Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников проекта.

Таблица 5.9. Ограничения проекта:

Фактор	Ограничения/допущения
Бюджет проекта:	750 000р
Источник финансирования:	ГЗ «Наука» (базовая), проект 4.1769.ГЗБ.2017
Сроки проекта:	01.01.2017 - 31.12.2019
Дата утверждения плана управления проектом:	01.01.2017
Дата завершения проекта:	31.12.2019
Прочие ограничение и допущения:	-

### 5.5 План проекта

Календарный план проекта предоставлен в таблице 5.10.

Таблица 5.10. Календарный план проекта:

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	ФИО ответственных
1	Постановка целей и задач	2	30.01.17	31.01.17	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.
2	Изучение литературы	59	01.02.17	31.03.17	Колпашиков Д.Ю.
3	Разработка алгоритмов прямой кинематики	40	03.04.17	12.05.17	Колпашиков Д.Ю.

4	Разработка алгоритмов обратной кинематики	40	26.06.17	28.07.17	Колпашиков Д.Ю.
5	Конструирование катетера	26 7	04.09.17	29.09.17	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.
6	Сборка катетера	3	02.10.17	04.10.17	Колпашиков Д.Ю.,
7	Конструирование стенда	26 7	09.10.17	03.11.17	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.
8	Сборка стенда	10	06.11.17	15.11.17	Колпашиков Д.Ю.,
9	Проведение экспериментов	12	20.11.17	01.12.17	Колпашиков Д.Ю.,
10	Анализ результатов	5	04.12.17	08.12.17	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.
11	Оформление расчетно-пояснительной записки	54	22.01.18	16.03.17	Колпашиков Д.Ю.,
12	Подведение итогов	3	19.03.17	21.03.17	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.
Итого		280	30.01.17	21.03.17	

В таблице 5.11 представлена диаграмма Ганта. Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм, который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Таблица 5.11. Календарный план-график проведения НИОКР

Код работы	Вид работ	Исполнители	Длительность, дни	Продолжительность выполнения работ														
				янв.	фев.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	январ.	фев.	март
1	Постановка целей и задач	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.	2	<div></div>	<div></div>													
2	Изучение литературы	Колпашиков Д.Ю	59	<div></div>	<div></div>													
3	Разработка алгоритмов прямой	Колпашиков Д.Ю	40			<div></div>												
4	Разработка алгоритмов обратной	Колпашиков Д.Ю	40					<div></div>										
5	Конструирование катетера	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.	26					<div></div>	<div></div>									
6	Сборка катетера	Колпашиков Д.Ю	3								<div></div>							
7	Конструирование стенда	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.	26							<div></div>	<div></div>							
8	Сборка стенда	Колпашиков Д.Ю	10										<div></div>					
9	Проведение экспериментов	Колпашиков Д.Ю	12											<div></div>				
10	Анализ результатов	Колпашиков Д.Ю., Арляпов А.Ю.	5										<div></div>	<div></div>				
11	Оформление расчетно-пояснительной записки	Колпашиков Д.Ю	54													<div></div>	<div></div>	
12	Подведение итогов	Арляпов А.Ю.	3													<div></div>		

## 5.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

### 5.6.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы. Результаты представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12. Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты:

Наименование	Цена за единицу, руб.	Количество	Сумма, руб.
Кольца из оргстекла	-	40 шт.	300
Ключ комб. 6X6 мм	41	1 шт.	41
Метчикодержатель	138	1 шт.	138
Сверло СЦП 0.45	27	3 шт.	81
Сверло СЦП 0.5	26	2 шт.	52
Сверло СЦП 0.6	26	3 шт.	78
Сверло СЦП 0.8	22	2 шт.	44
Метчик М5	134	1 шт.	134
Метчик М6	137	1 шт.	137
ПХВ трубка	35	4 шт.	140
Фанера березовая	-	-	365
Ткань зеленая	-	-	140
Профиль конструкционный 20x20 (без покрытия)	185	6 м	1110
Г-соединитель 40x40В, паз 6	27	6 шт.	162
Заглушка торцевая 20x20	20	4 шт.	80

Уголок 20x20L, паз 6	44,5	30 шт.	1335
Проволока UD Nichrom 26ga, 30ft	330	1 шт.	330
Проволока НИХРОМ RuPin d=0.1	27	30 м	810
Стандартные крепежные изделия	-	-	414,84
Всего за материалы			5891,84
Транспортно-заготовительные расходы			1109
Итого по статье С <sub>м</sub>			7000,84

### 5.6.2 Заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.2)$$

Где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (5.3)$$

Где  $T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочих дней;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (5.4)$$

Где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течении года;

При отпуске в 24 раю дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени (272 дня);

Месячный должностной оклад рассчитывается по формуле

$$З_m = З_б \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (5.5)$$

Где  $З_б$  – базовый оклад, руб;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент;

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;

$k_p$  – районный коэффициент;

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 5.13.

Таблица 5.13. Основная заработная плата:

Исполнитель	$З_б$	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$З_m$	$З_{дн}$	$T_{раб}$	$З_{осн}$
Арляпов А.Ю.	26300	0,2	0,1	1,3	44447	1830,17	24	43924,09
Колпашиков Д.Ю.	14874,45				25137,82	1035,9	275	284648,8

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении работ. В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п.

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн}, \quad (5.6)$$

Где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

Расчет дополнительной заработной платы представлен в таблице 5.14.

Таблица 5.14. Дополнительная заработная плата:

Исполнитель	$З_{\text{осн}}$	$k_{\text{доп}}$	$З_{\text{доп}}$
Арляпов А.Ю.	43924,09	0,1	4392,41
Колпашиков Д.Ю.	284648,8	0,1	28464,88

Расчет затрат по статье заработной платы представлен в таблице 5.15.

Таблица 5.15. Основная заработная плата:

Заработная плата	Арляпов А.Ю.	Колпашиков Д.Ю.
Основная	43924,09	284648,8
Дополнительная	4392,41	28464,88
Зарплата исполнителя	48316,5	313113,68
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	361430,18	

### 5.6.3 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot C_{\text{зп}}, \quad (5.7)$$

Где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 361430,18 = 108429,5 \text{ руб}; \quad (5.8)$$

### 5.6.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot C_{\text{зп}}, \quad (5.9)$$

Где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,7 \cdot 361430,18 = 253001,13 \text{ руб.}, \quad (5.10)$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости. Все данные сведены в таблицу 5.16.

Таблица 5.16. Группировка затрат по статьям.

Наименование статьи затрат	Сумма, руб.
Сырье, материалы и покупные изделия	7 000,84
Заработная плата	361 430,18
Отчисления на социальные нужды	108 429,5
Накладные расходы	253 001,13
Итоговая плановая себестоимость	729 861,65

## 5.7 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию о них сведена в таблицу 5.17.

Таблица 5.17. Реестр рисков проекта.

№	Риск	Потен- циальное воздействие	Вероят- ность наступ- ления	Влия- ние риска	Уро- вень риска	Способы смягчения	Условия наступ- ления
1	Техни- ческий	Невозмож- ность осуществить сборку	3	5	Высо- кий	Поиск альтерна- тивных поставщиков	Отсутствие комплек- тующих у постав- щиков



2	Технологический	Невозможность осуществить сборку	1	4	Средний	Закупка необходимого оборудования	Отсутствие инструмента для сборки
3	Финансирование	Снижение бюджета	2	4	Средний	Комплекующие изделия по низкой цене	Экономический кризис

## 5.8 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности (таблица 5.18).

Степень участия в проекте может характеризоваться следующим образом:

Ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход.

Исполнитель (И) – лицо, выполняющие работы в рамках этапа проекта.

Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение).

Таблица 5.18. Матрица ответственности.

Этап	Колпашиков Д.Ю.	Арляпов А.Ю.
1	-	И, У
2	И	О
3	И, О	У
4	И, О	У
5	И	О, У
6	И, О	У
7	И	О, У
8	И, О	У
9	И	О, У
10	И	О, У
11	И, О	У
12	И	О, У

## 5.9 Оценка экономической эффективности проекта

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, т.е. соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта. Так как последние являются единовременными, то мы имеем дело с частным случаем задачи оценки экономической эффективности инвестиций, т.е. вложением денежных средств в предприятие, организацию, отраслевую, региональную социально-экономическую систему и т.п. с целью получения определенного результата в будущем. Отличительными особенностями инвестиций, особенно когда речь идет о вложениях в нематериальные активы в форме НИР являются:

- результат может быть получен в течение ряда последующих лет в общем случае – на протяжении жизненного цикла создаваемой системы;
- результаты инвестиций содержат элементы риска и неопределенности;
- связывание на некоторое время финансовых средств инвестора.

Однако в данной работе провести оценку экономической эффективности проекта не представляется возможным.

## 5.10 Оценка научно-технического уровня НИР

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод бальных оценок.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (5.11)$$

Где  $R_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го признака научно-технического эффекта (таблица 5.19);

$n_i$  – количественная оценка  $i$ -го признака научно-технического эффекта, в баллах (таблицы 4.20 - 22).

Таблица 5.19. Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак НТУ	Примерное значение весового коэффициента $n_i$
Уровень новизны	0,4
Теоретический уровень	0,1
Возможность реализации	0,5

Таблица 5. 20. Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 5.21. Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 5.22. Возможность реализации научных, теоретических результатов по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Оценки научно-технического уровня НИР приведены в таблице 5.23.

Таблица 5.23. Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Значимость	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
Уровень новизны	0,4	Относительно новая	4	Наложение ограничений на известный алгоритм для работы с непрерывными роботами
Теоретический уровень	0,1	Разработка способа	6	Разработка способа для управления непрерывными роботами
Возможность реализации	0,5	В течение первых лет	10	На данный момент алгоритм можно применять для управления непрерывными роботами

Из таблицы 5.23 можно сделать вывод, работа является модифицированием известного алгоритма для работы с механизмами, для которых он ранее не применялся. Тем самым получается новым способ управления непрерывными роботами, в частности роботизированными катетерами.

Исходя из оценки признаков НИОКР, показатель научно-технического уровня для данного проекта составил:

$$K_{\text{НТУ}} = 0,4 \cdot 4 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 7,2, \quad (5.12)$$

Для оценки уровня НТЭ коэффициент  $K_{н\text{ту}}$  сравнивается со значениями из таблицы 5.24.

Таблица 5.24. Оценка уровня научно-технического эффекта.

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

Таким образом, данное исследование имеет средний уровень НТЭ.

### 5.11 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

#### 5.11.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (5.13)$$

Где  $I_{\Phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

### 5.11.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m = \sum_{i=1}^n a_i b_i, \quad (5.14)$$

Где  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Сравнительная оценка характеристик проекта и аналогов приведена в таблице 5.25.

Таблица 5.25. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	4
Удобство в эксплуатации	0,20	5	4
Помехоустойчивость	0,05	4	3
Энергосбережение	0,05	2	2
Надежность	0,2	5	4
Материалоемкость	0,25	2	2
ИТОГО	1	22	20

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_m^{TP} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,25 = 4,05, \quad (5.15)$$

$$I_m^a = 1 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,25 = 3,2, \quad (5.16)$$

### 5.11.3 Интегральный показатель эффективности разработки

Интегральный показатель эффективности разработки  $I_{финр}$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр} = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, \quad (5.17)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта – таблица 5.26.

Сравнительная эффективность проекта рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}, \quad (5.18)$$

Таблица 5.26. Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,83
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,2	4,05
3	Интегральный показатель эффективности	4,77	5,3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,13	

При сравнении значений интегральных показателей эффективности разработки и аналога, можно сказать, что эффективным решением является производство катетера из трубки ПВХ с кольцами из оргстекла.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ61	Колпашикову Д. Ю.

Школа	ИШНПТ	Отделение	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.01 «Машиностроение»

**Тема дипломной работы: «Кинематический анализ кардиального катетера для обеспечения роботизированных миниинвазивных операций»**

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>Лабораторное помещение в Научном Парке ТПУ. В помещение подведена холодная вода и слив. Лаборатория оборудована вентиляцией, письменными столами, рабочими компьютерами, стульями. Возможно возникновение вредных факторов производственной среды (повышенная запыленность воздуха рабочей зоны, повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны, повышенная или пониженная влажность воздуха, недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенная напряженность электрического поля, повышенная напряженность магнитного поля. Возможно возникновение опасных факторов: Поражение электрическим током, пожар.</p>
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>1. ГОСТ 12.0.002-2014 2. ГОСТ 12.0.003-2015 3. СанПиН 2.2.4.548-96 4. СП 52.13330.2016 5. СП 51.13330.2011 6. ГОСТ 12.1.029-80 7. ГОСТ 12.1.003-76 8. НПБ 105-03 9. СНиП 2.01.02-85</p>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>Анализ выявленных вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отклонение показателей микроклимата в помещении</li> <li>- повышенный уровень шума</li> <li>- отсутствие или недостаток естественного света;</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> </ul>	<p>Анализ выявленных опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- поражение электрическим током (источниками являются ПК и блок питания стенда);</li> <li>- пожароопасность (источником является электрооборудование)</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	
<b>3. Охрана окружающей среды:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	Отходы на рабочем месте: бумага, отходы из полимеров, картриджи и лампочки.
<b>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</li> </ul>	<p>В лабораторном помещении возможны следующие ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Сильные морозы (природного характера)</li> <li>- Диверсия, пожар (техногенного характера)</li> </ul> <p>Предусмотрены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства</p>
<b>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	Приведены перечень НТД, используемых в данном разделе, схема эвакуации при пожаре, расчет освещенности рабочего места и схема размещения светильников на потолке согласно проведенному расчету
<b>Перечень графического материала:</b>	
1. План эвакуации 2. План размещения светильников на потолке рабочего помещения	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>26.02.18</b>
---	-----------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Ю. М.	Д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Колпащиков Д. Ю.		

## **6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Данный раздел дипломной работы посвящен анализу и разработке мер по обеспечению благоприятных и безопасных для работы условий труда. Здесь рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

Цель данной работы является исследование закономерностей движения роботизированного катетера с двумя секциями изгиба.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение функционально взаимосвязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда и др.), необходимых для осуществления трудового процесса. При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание охране окружающей среды, а в частности, организации утилизации отходов.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в городе Томске, наиболее типичной ЧС является мороз. Так же, одним наиболее распространенных ЧС является пожар. Предусмотрены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства

### **6.1 Анализ опасных и вредных факторов**

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием некоторых опасных и вредных факторов (ГОСТ 12.0.002-2014 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термины и определения»), которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические и психофизиологические (ГОСТ 12.0.003-2015 «Система

стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»)

На участке, где находится стенд, могут быть следующие вредные и опасные факторы с соответствием с ГОСТ 12.0.003-2015:

- а) наличие не комфортного микроклимата;
- б) производственного шума;
- в) недостаточной освещенности;
- г) повышенная напряженность электрического поля;

### **6.1.1 Микроклимат в помещении**

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей.

В зависимости от условий микроклимата в организме человека происходят изменения ряда функций систем и органов, принимающих участие в терморегуляции — в системе кровообращения, нервной и пототделительной системах. При длительном пребывании в неблагоприятных микроклиматических условиях, с постоянным напряжением терморегуляции, возможны стойкие изменения физиологических функций организма — нарушение деятельности сердечно-сосудистой системы, угнетение центральной нервной системы, нарушение водно-солевого обмена. При резком или длительном охлаждении организма наблюдается стойкий сосудистый спазм в оболочковых тканях, который приводит к нарушению их питания и сильному охлаждению. Стойкое сужение сосудов при холодовом воздействии приводит к изменению уровня кровяного давления, наблюдается повышение артериального давления крови; при сильном переохлаждении может наступить и понижение максимального

артериального давления. Уменьшается число сердечных сокращений. Охлаждение организма приводит к угнетению центральной нервной системы, нарушению рефлекторной деятельности, снижению всех видов кожной чувствительности.

Параметры микроклимата могут меняться в широких пределах, в то время как необходимым условием жизнедеятельности человека является поддержание постоянства температуры тела благодаря терморегуляции, т.е. способности организма регулировать отдачу тепла в окружающую среду. Принцип нормирования микроклимата – создание оптимальных условий для теплообмена тела человека с окружающей средой.

Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности.

Для обеспечения комфортных условий используются как организационные методы (рациональная организация проведения работ в зависимости от времени года и суток, чередование труда и отдыха), так и технические средства (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопительная система).

Нормы оптимальных и допустимых метеорологических условий устанавливает СанПиН 2.2.4.548-96. Работа, относящаяся к инженерам – разработчикам, относится к категории 1а - работа с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимая сидя и сопровождающаяся незначительным физическим напряжением. Оптимальные и допустимые значения микроклимата даны в таблицах 6.1 и 6.2.

Таблица 6.1. Оптимальные параметры микроклимата в производственных помещениях

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22-24	60-40	0,1
Теплый		23-25	60-60	0,1

Таблица 6.2. Допустимые параметры микроклимата в производственных помещениях

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность, %, не более	Скорость движения воздуха, м/с	
				Температура воздуха ниже оптимальной	Температура воздуха выше оптимальной
Холодный	Ia	15-28	15-75	0,1	0,1
Теплый		15-28	15-75	0,1	0,2

Одними из основных мероприятий по оптимизации микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях являются обеспечение надлежащего воздухообмена и отопления, тепловая изоляция нагретых поверхностей оборудования.

### 6.1.2 Производственный шум

Промышленный шум (Производственный шум) — это совокупность различных шумов, возникающих в процессе производства и неблагоприятно воздействующих на организм. Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

Предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, дБ (эквивалентные уровни звукового давления, дБ), допустимые эквивалентные и максимальные уровни звука на рабочих местах в производственных и вспомогательных зданиях, на площадках промышленных предприятий для проникающего шума следует принимать согласно СП 51.13330.2011. Нормы для «помещения лабораторий для проведения экспериментальных работ, кабины наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону» представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3. Предельно допустимые и допустимые уровни звукового давления, дБ (эквивалентные уровни звукового давления, дБ), допустимые эквивалентные и максимальные уровни звука на рабочих местах в производственных и вспомогательных зданиях, на площадках промышленных предприятий

Назначение помещений или территорий	Время суток, ч	Уровни звукового давления (эквивалентные уровни звукового давления), дБ, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука $L_A$ , (эквивалентный уровень звука $L_{Aэкв}$ ), дБА	Максимальный уровень звука $L_{Amax}$ , дБА
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Помещения лабораторий для проведения экспериментальных работ, кабины наблюдения и дистанционного управления без речевой связи по телефону	-	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75	90

Источниками шума являются ПК и система управления роботизированный катетером. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочей месте

соответствует значению 70 дБА. Для снижения уровня шума, конструкцией стенда предусмотрен закрытый корпус. При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты (СИЗ) согласно ГОСТ 12.1.029-80.

К СКЗ относятся средства, снижающие шум в источнике его возникновения и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта (шумоизолирующие и шумопоглощающие перегородки из пористых материалов - дерева, пластмасс, пенобетона и др).

СИЗ являются противошумные наушники, противошумные вкладыши, противошумные шлемы и каски, противошумные костюмы.

### **6.1.3 Освещение**

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Согласно СП 52.13330.2016 в лаборатории, где происходит работа VI зрительного разряда, независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном, освещенность при системе общего освещения должна быть не ниже  $E = 200$  Лк.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента использования светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Длина помещения  $A = 8$  м, ширина  $B = 6$  м, высота  $H = 3,5$  м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 0,8$  м.

Площадь помещения:

$$S = A \cdot B = 6 \cdot 8 = 48 \text{ м}^2, \quad (6.1)$$

Коэффициент отражения стен оклеенных светлыми обоями с окнами, без штор  $\rho_c = 30\%$ , потолка светлой поверхности  $\rho_{\Pi} = 50\%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $KЗ = 1,5$ . Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z = 1,1$ .

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен  $\Phi_{\Pi} = 2300$  Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна  $A_{\text{св}} = 1227$  мм, ширина  $B_{\text{св}} = 265$  мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda = 1,2$ .

Расстояние светильников от перекрытия (свес):  $h_c = 0,4$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 0,8 - 0,4 = 2,3 \text{ м}, \quad (6.2)$$

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8 \cdot 6}{2,3 \cdot (8 + 6)} = 1,49 \quad (6.3)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа



ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\text{с}} = 30\%$ ,  $\rho_{\text{п}} = 50\%$ . и индексе помещения  $i = 1,49$  равен  $\eta = 0,43$ .

Потребные группы люминесцентных ламп светильника рассчитываются по формуле:

$$N = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{\text{п}} \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2300 \cdot 0,46} \approx 15 = 16, \quad (6.4)$$

Общее число светильников:  $N_{\text{св}} = 8$ . Светильники размещены в  $N_A = 2$  ряда по  $N_B = 4$  светильников в каждом.

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$L_1 = 3 \cdot (A - B_{\text{св}} \cdot N_A) / 11 = 3 \cdot (8000 - 265 \cdot 4) / 11 = 1892 \text{ мм}, \quad (6.5)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формулам:

$$L_2 = (B - A_{\text{св}} \cdot N_B) / 3 = 3 \cdot (6000 - 1227 \cdot 2) / 5 = 2128 \text{ мм}, \quad (6.6)$$

План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами представлен на рисунке 6.1.

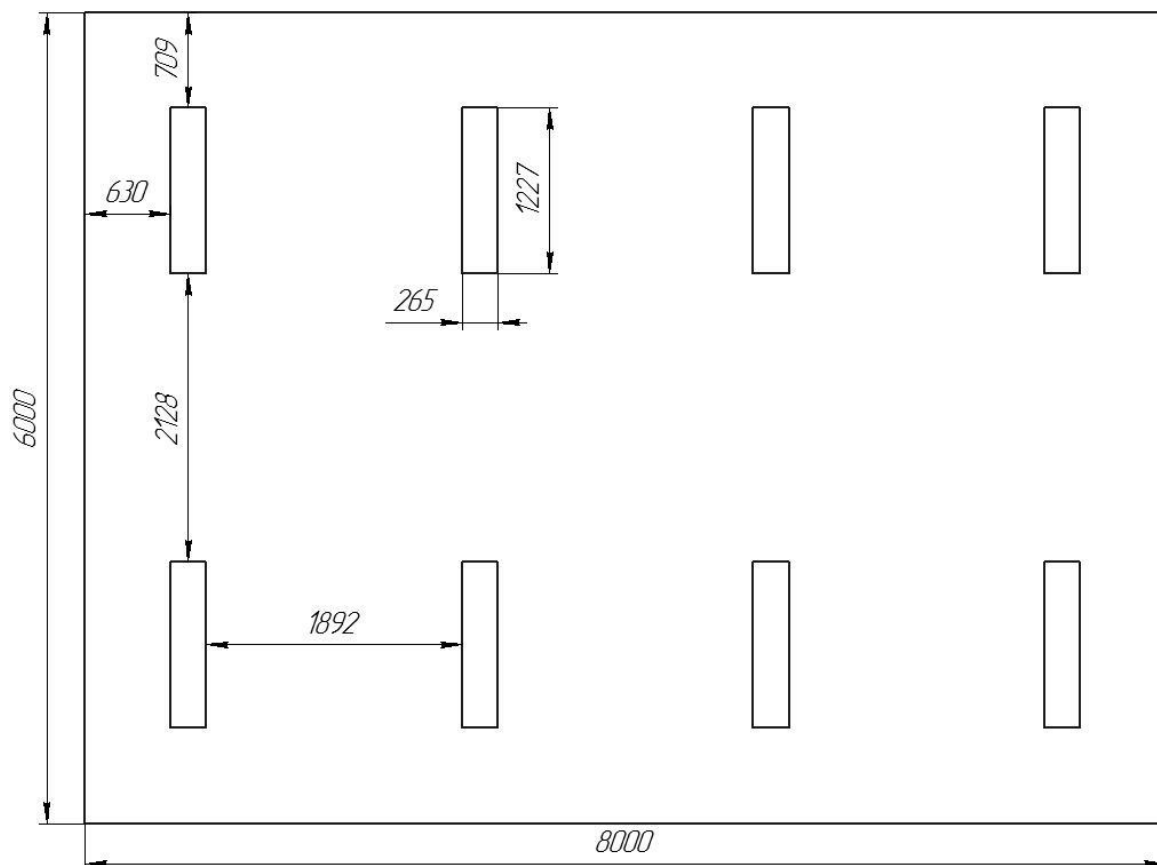


Рисунок 6.1. План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Расчёт светового потока группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{рас}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 8 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,46} = 2152 \text{ лм} \quad (6.7)$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{П}} - \Phi_{\text{рас}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (6.8)$$

$$\frac{\Phi_{\text{П}} - \Phi_{\text{рас}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% = \frac{2300 - 2152}{2300} \cdot 100\% = 6,4\%, \quad (6.9)$$

Таким образом:  $-10\% \leq 6,4\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

### 6.1.4 Повышенная напряженность электрического поля

Безопасным для сотрудников считается напряжение электрической сети  $U \leq 36$  Вольт, сила тока  $I \leq 0.1$  А,  $R_{\text{заземления}} < 4$  Ом.

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества. Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (помещения особо опасные). В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220В и частотой 50Гц. По опасности электропоражения лаборатория относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного соприкосновения с имеющими соединение с землей металлическими предметами и металлическими корпусами оборудования.

В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

В качестве средства индивидуальной защиты в электроустановках до 1000В используют диэлектрические перчатки, изолирующие и измеряющие электроэнергию клещи, инструменты с изолирующими рукоятками, эффективные штанги. Перчатки делают из резины толщиной от 0,7 до 1,2 мм. Штанги используются, чтобы снимать и устанавливать патроны предохранителей, а также для наложения на некоторое время защитных заземлений. Материалом изолирующих клещей обычно является пластмасса. Этот вид клещей применяют в том случае, если приходится работать с трубчатыми предохранителями. Для начала работы, нужно убедиться, что под ногами надёжные изолирующие подмостья.

## **6.2 Пожарная безопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории Д - негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам). Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения и локализации пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- в) отключение электрооборудования, освещения и электропитания при предполагаемом отсутствии обслуживающего персонала или по окончании работ;
- г) курение в строго отведенном месте;
- д) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу (рисунок 6.2).

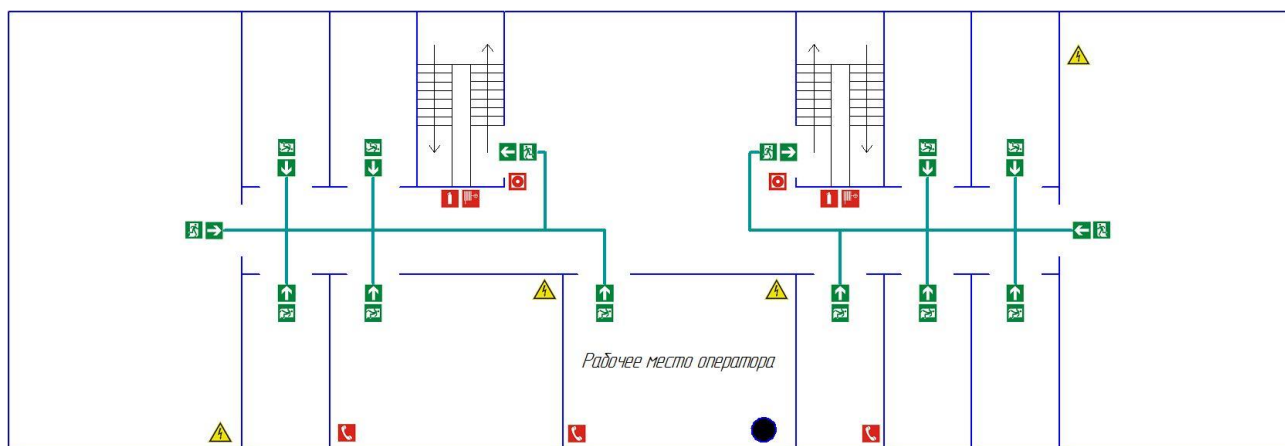


Рисунок 6.2. План эвакуации

### 6.3 Охрана окружающей среды

Охрану окружающей среды можно представить, как комплекс государственных, международных и общественных мероприятий, направленных на рациональное

использование природы, восстановление, улучшение и охрану природных ресурсов. Защита окружающей среды на современном этапе помимо экономической задачи - повышения общественной производительности труда - включает также и социально-экономическую задачу - улучшение условий жизни человека, сохранение его здоровья.

Безотходная технология является наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий. Под понятием «безотходная технология» следует понимать комплекс мероприятий в технологических процессах от обработки сырья до использования готовой продукции, в результате чего сокращается до минимума количество вредных выбросов и уменьшается воздействие отходов на окружающую среду до приемлемого уровня.

Бумага является самым распространенным побочным продуктом в виде разных документов и чертежей. Снизить потребление и, соответственно, отходы бумаги можно с помощью перехода с бумажных на цифровые носители, введением цифрового документооборота и систем САПР. Также существуют программы по утилизации и переработке макулатуры в новый бумажный продукт, что снижает потребность в вырубке лесов. При правильной переработке более 75% макулатуры попадает во вторичный оборот.

Для полимерных отходов, таких как фотополимерная резина и леска, наиболее эффективный способ утилизации – рециркуляция и вторичная переработка. Отходы можно сдавать в пункты приема, откуда их примут специализированные компании, химически переработают и используют вторично.

Ртуть содержащие лампы необходимо герметично упаковать и отправить в организацию, занимающуюся их утилизацией.

Картриджи необходимо сдать в организацию, занимающуюся их утилизацией. Утилизация картриджей проводится двумя способами:

- Наиболее распространенный способ – переработка с последующим использованием для новых изделий. Многие компании-производители собранные отработанные изделия передают дочерним перерабатывающим организациям. Они проводят чистку, необходимый ремонт, замену изношенных деталей, заправку. Готовые для вторичного использования картриджи предлагаются покупателям под другим брендом.

- Другой способ – механическое и термическое разложение. Изделия подвергаются сортировке и разделению на составляющие компоненты, после чего пластиковые и металлические части измельчают и переплавляют при высокой температуре с получением вторсырья. Утилизация тонера подразумевает воздействие на него температуры в 1000°C, в процессе не происходит образование вредных соединений. Способ является экологически безопасным.

При написании дипломного проекта на предприятии вредных выбросов в атмосферу, почву и водные источники не производилось, радиационного заражения не произошло, чрезвычайные ситуации не наблюдались, поэтому существенных воздействий на окружающую среду и соответственно вреда природе не оказывалось.

#### **6.4 Чрезвычайные ситуации**

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Томской области в зимнее время года характерны сильные морозы. Достижение аномально низких температур приводит к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, остановке работы, обморожениям. В



случае аварии на тепловых сетях должны быть предусмотрены запасные обогреватели (например: газовые каталитические горелки). Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекращалась. Также сильные морозы могут вызвать аварии на электросетях, водопроводе и отсутствие на дорогах городского транспорта. Во избежание последнего следует оставлять транспорт (автобус) в теплом гараже для развозки людей в случае перебоя в транспортном сообщении. В случае отключения воды должно присутствовать автономное водоснабжение, которого должно хватать минимум на сутки для исполнения всех нужд предприятия. Аналогично в энергосистемах должны использоваться автономные источники питания (аккумуляторы, дизельные генераторы) для функционирования жизнедеятельности во время аварий.

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Зачастую такие угрозы оказываются ложными. Но случаются взрывы и в действительности. Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

## **6.5. Законодательные акты**

1. ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термины и определения
2. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

3. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
4. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*
5. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)
6. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация
7. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1)
8. НПБ 105-03 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности
9. СНиП 21-01-97\* Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2)
10. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности

## **Список использованных источников.**

1. Camarillo D.B., Carlson C.R., Salisbury J.K. Task-Space Control of Continuum Manipulators with Coupled Tendon Drive // Springer Tracts Adv. Robot. 2009. Vol. 54, № 4. P. 271–280.
2. Ganji Y., Janabi-Sharifi F., Cheema A.N. Robot-assisted catheter manipulation for intracardiac navigation // Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg. 2009. Vol. 4, № 4. P. 307–315.
3. Penning R.S. et al. An evaluation of closed-loop control options for continuum manipulators // Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2012. P. 5392–5397.
4. Neppalli S. et al. Closed-form inverse kinematics for continuum manipulators // Adv. Robot. 2009. Vol. 23, № 15. P. 2077–2091.
5. Loschak P.M. et al. Ultrasound Imaging Catheters // IEEE Trans. Robot. 2016. Vol. 33, № 1. P. 1–11.
6. ВОЗ | Сердечно-сосудистые заболевания // WHO. World Health Organization, 2015.
7. Скворцова: смертность от сосудистых заболеваний снизилась на 10% – журнал Vademecum [Electronic resource]. URL: <https://vademec.ru/news/2017/10/27/skvortsova-smertnost-ot-sosudistykh-zabolevaniy-snizilas-na-10/> (accessed: 26.03.2018).
8. Оганов Р. Г., Концевая А. В., Калинина А. М. Экономический ущерб от сердечно-сосудистых заболеваний в Российской Федерации // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2011. – Т. 10. – №. 4. – С. 4-9.
9. Riga C. V. et al. Evaluation of robotic endovascular catheters for arch vessel cannulation // J. Vasc. Surg. Elsevier, 2011. Vol. 54, № 3. P. 799–809.
10. Burgner-Kahrs J., Rucker D.C., Choset H. Continuum Robots for Medical

- Applications: A Survey // IEEE Trans. Robot. 2015. Vol. 31, № 6. P. 1261–1280.
11. Walker I.D., Choset H., Chirikjian G.S. Snake-Like and Continuum Robots // Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 481–498.
  12. Kong S., Application F., Data P. ( 12 ) United States Patent. 2011. Vol. 2, № 12. P. 12–15.
  13. Ali A., Plettenburg D.H., Breedveld P. Steerable Catheters in Cardiology: Classifying Steerability and Assessing Future Challenges // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2016. Vol. 63, № 4. P. 679–693.
  14. Kabe A. N., Thornton T. L., Weiss A. M. Steerable assembly for surgical catheter : заяв. пат. 13675934 США. – 2014.
  15. Jelínek F. et al. Classification of Joints Used in Steerable Instruments for Minimally Invasive Surgery—A Review of the State of the Art // J. Med. Device. 2015. Vol. 9, № 1. P. 010801.
  16. Ghosh A., Corves B. Introduction to Micromechanisms and Microactuators. 2015. Vol. 28.
  17. Hansen Medical | Medical Robotics, Robotic Catheter [Electronic resource]. URL: <http://www.hansenmedical.com/us/en> (accessed: 21.03.2018).
  18. Carpi F., Pappone C. Stereotaxis Niobe<sup>®</sup> magnetic navigation system for endocardial catheter ablation and gastrointestinal capsule endoscopy // Expert Rev. Med. Devices. Taylor & Francis, 2009. Vol. 6, № 5. P. 487–498.
  19. ГОСТ ISO 10993-1-2011 Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 1. Оценка и исследования, ГОСТ от 13 декабря 2011 года №ISO 10993-1-2011.
  20. Webster R.J., Jones B.A. Design and kinematic modeling of constant curvature

- continuum robots: A review // Int. J. Rob. Res. 2010. Vol. 29, № 13. P. 1661–1683.
21. Waldron K.J., Schmiedeler J. Kinematics // Springer Handbook of Robotics. Cham: Springer International Publishing, 2016. P. 11–36.
  22. Aristidou A., Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem // Graph. Models. Elsevier Inc., 2011. Vol. 73, № 5. P. 243–260.
  23. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Мелкосерийное и единичное производство. Изд. 2-е, М., «Машиностроение», 1974, 220с. (ЦБПНТ при НИИТруда).

## Приложение А

Robotic catheters: design, actuation and approaches to solving kinematic tasks

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ61	Колпащиков Д.Ю.		

Консультант отделения материаловедения, ИШНПТ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Арляпов А.Ю.	К.т.н.		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Пичугова И. Л.			

## **Introduction**

Cardiovascular disease (CVD) is the name for group of diseases of heart and blood vessel. Causes of CVD are disorder of heart and blood vessels. These diseases include ischemic heart disease, cerebrovascular disease, high blood pressure, rheumatic heart disease, congenital heart disease.

At the moment, one of the most progressive methods of treating these diseases is cardiac catheterization - a minimally invasive procedure performed by inserting a catheter tube through a small incision into femoral vein and advancing catheter through a vein into heart. The purpose of this intervention procedure is to reach certain places within heart and conduct an examination or treatment.

In modern robotic systems, catheters with several flexural sections are used. They are moving relative to each other for reaching required point. At the moment, the positioning of catheter's tip is performed by the surgeon manually.

The main problem of controlling and positioning of the catheter is related to the advancing of catheter to the required location and the positioning of instrument's tip. However, the goal is not only to reach the required location, but also to correctly orient the tool.

At present, there are algorithms of inverse kinematics that allow automatic positioning of the catheter at a certain point. However, they are either unable to control the orientation of catheter's tip [1-4], or designed to work with a catheter consisting of only one flexural section [5].

This paper presents an inverse kinematics algorithm which is capable of reaching the desired point with taking into account predetermined orientation of a catheter with several sections.

# **1 Robotic catheters: design, actuation and approaches to solving kinematic tasks**

## **1.1 Cardiovascular diseases**

Cardiovascular disease is the name for group of diseases of heart and blood vessel. Causes of CVD are disorder of heart and blood vessels. These diseases include ischemic heart disease (infarcts), cerebrovascular disease (insult), high blood pressure (hypertension), peripheral arterial disease, rheumatic heart disease, congenital heart disease and heart failure.

According to WHO, CVD are leading cause of death worldwide. According to their estimates, in 2012, 17.5 million people died by CVD, which is 31% of all deaths worldwide [6]. According to WHO forecasts, by 2020 the number of deaths by CVD in the world will reach 25 million.

In 2015, in Russia CVD mortality rate was almost 48.7% of the total number of deaths in the country, while in the UK (29%), France (22%) and Germany (35%), this amount is lower [7]. And most of the deaths occur with people of working age, which is a significant economic and social problem. From 2006 to 2009, the economic costs of CVD treatment were 3% of GPD (Gross Domestic Product) [8].

## **1.2 Cardiac surgery**

The major treatment method of patients with CVD is open heart surgery with the use of cardiopulmonary bypass. During operation, heart stops and patient is connected to a cardiopulmonary bypass device (heart–lung machine). Despite the fact that technique of such surgeries is mastered, and level of hospital mortality is low, postoperative complications related to use of cardiopulmonary bypass (gaseous microemboli, hypoxia of vital organs, systemic inflammatory reaction, hemolysis) remain a serious problem. Consequently, today a full range of cardiosurgical operations performed on the open heart leads to severe postoperative complications with long-term rehabilitation and claimed to be an important problem in cardiology.



### **1.3 Minimally invasive interventions**

Due to advanced technologies, as well as to avoid complex invasive operations, minimally invasive procedures are currently used to treat various heart diseases. Minimally invasive procedure is a cardiac operation performed through a small incision, which allows treating various heart diseases. Such operations, for example, help to correct problems with heart valves through small openings between ribs and chest. Through these openings surgical instruments and a camera are introduced to perform various manipulations. Advantage of this minimally invasive procedure is that it isn't necessary to perform a 30 cm chest incision, considered one of the most painful and difficult stages of open heart surgery. This advantage can significantly reduce time of rehabilitation and period of hospitalization compared with open heart surgery. In addition, possibility of postoperative complications is extremely low.

### **1.4 Catheter procedures**

In recent decades, catheter endovascular procedures have been rapidly developing as an alternative, which allow implementing correction of certain cardiac pathologies on the beating heart without use of cardiopulmonary bypass.

Cardiac catheterization (Figure 1.1) is a minimally invasive procedure that is performed for treatment and examination purposes for CVD. During the procedure, cardiologist introduces a thin-walled flexible tube (catheter) through one of the arteries located on the arm, neck or groin. Then the catheter under control of visualization means is advanced along the vascular bed and reaches the heart.

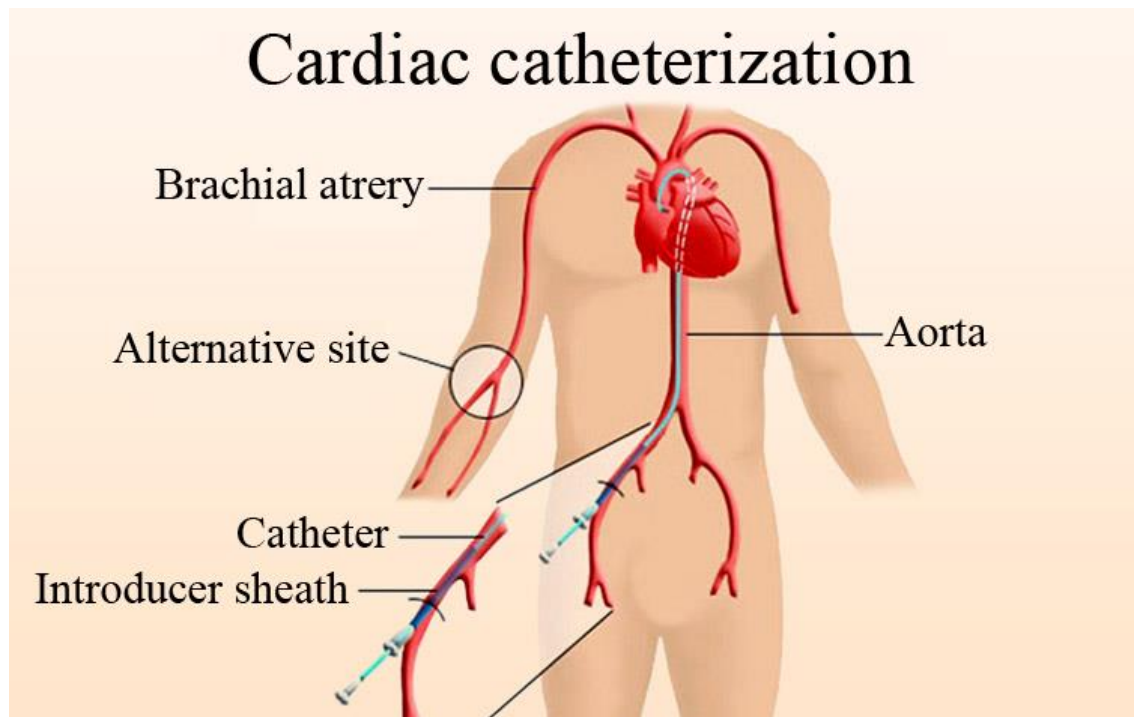


Figure 1.1. Catheterization scheme

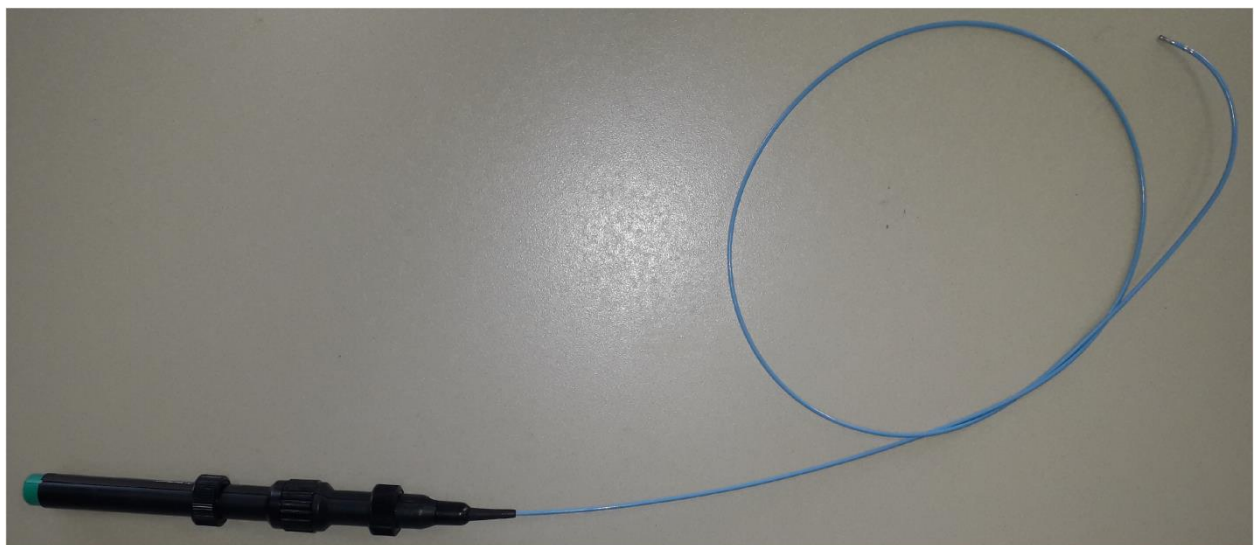
In the past few years, significant progress has been achieved in the endovascular methods of examination and treatment of CVD. Availability of new visualization techniques and development of delivery catheters allow performing various interventions on beating heart without the use of artificial circulation, including stenting of vessels, radiofrequency ablation in case of cardiac arrhythmias and closing of atrial and interventricular septal defects. However, despite the results achieved, a wide range of reconstructive interventions are performed today only by open heart operation with using of artificial circulation.

#### 1.4 Catheters

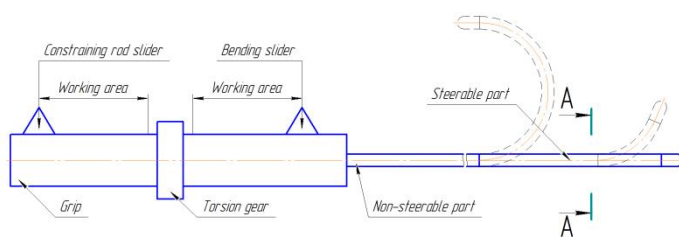
Catheters are medical devices that can be introduced into body to treat diseases or perform a surgical procedure. They can be introduced into body cavity, canal or vessel. Functionally, they allow drainage, introduction of liquids or gases, access to surgical instruments, and perform many other tasks depending on type of catheter. Introduction process of catheter is called a catheterization. Most of catheters are a thin-walled flexible tube of medical materials, but there are catheters with different levels of rigidity, depending on the application. Catheters can be manual and robotic.

### 1.5.1 Manual catheters

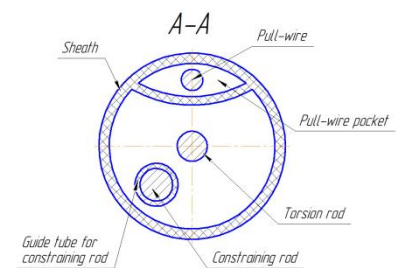
Manual catheter is a flexible thin-walled tube (Figure 1.2a) of medical polymers at one end of which is placed a surgical instrument. Tube is divided into two parts - steerable and non-steerable. Both parts have minimum stiffness, which is necessary to prevent damage to walls of blood vessels and heart when catheter advances. However, in order to restrict movement to only steerable part, non-steerable part is made more rigid by braiding with metal wire.



a)



b)



c)

Figure 1.2. Design of the hand catheter: a – external view of the catheter for ablation; b – scheme of ablation catheter; c – internal construction of the controlled part of the catheter

Surgeon steers the bending of catheter by moving sliders on the grip (Figure 1.2b). For linear movement of the catheter and its rotation around its axis, surgeon moves the grip itself.

Through the tube pass various structural elements responsible for movement of catheter (Figure 1.2c):

The pull-wire is the main element of catheter steering. It provides bending of catheter in one plane due to off-center compression. Wire is connected to the catheter's tip and the corresponding slider on the grip. When surgeon pulls the slider, the wire off-centrally compresses tube of catheter and it bends.

The torsion rod is an additional steering element. It provides twisting of steerable part of catheter to reach pinch points. At the one end, it is cantilevered at the center of the catheter's tip, and at the other end on torsion gear. When this rod is twisted, the steerable part of the catheter begins to coil up.

The constrain rod is an additional steer element. It allows reducing steerable part of catheter, thereby reducing bending radius. It is a rigid rod, in contrast to the steerable part, that advances along the guide tube by movement of corresponding slider.

Also, to reach pinch points, a set of a controlled sheath and a standard catheter passing through are used.

This method of treatment is less traumatic than open heart surgery. However, existing catheters designed primarily for manual control and require an additional time cost for positioning, which leads to an increase in X-ray irradiation dose of both patient and surgeon. In addition, catheter is unstable, and there is no synchronization of its movement relative to moving structures of heart.

### **1.5.2 Robotic catheters**

In the last two decades, robotic surgical operations have been actively used in the field of cardiovascular surgery. Unlike traditional heart surgery, modern robotic catheter systems (Hansen Medical, Stereotaxis, Boston Scientific, Magnetecs) are less traumatic and using of robotic instruments allows precision work in a limited space, reduces operation time and improves stability of catheter's tip in comparison with standard manual navigation [9].

A serious disadvantage of modern robotic systems is cumbersomeness and expensiveness. In addition, using systems that control tip of catheter by magnetic field (Stereotaxis, Magnetecs) is limited by strict requirements for installation of such equipment.

### 1.6 The design of robotic catheters

All catheters are continuum robots – a steerable structure that forms curves with continuous tangent vectors [10]. This class of robots is continuously curving elastic structures with their number of joints tending to infinity, and as a result, an infinite number of degrees of freedom, but with their link lengths tending to zero and they don't contain identifiable rotational joints and links [11].

In robotic catheters (Figure 1.3) more rigid materials than in manual catheters are used, and their flexibility is provided by micromechanical joints [12]. They are continuously curved structures, but they are containing identifiable rotational joints and rigid links. Such robots are called pseudo-continuous.



Figure 1.3. Artisan Extend Control Catheter – robotic catheter

In manual catheters, only one flexural section is used (Figure 1.4a), while robotic catheters can use several flexural sections [13]. A greater number of sections increases

working area and dexterity of catheter, but complicates its steering. Catheters with several sections are divided into serial (Figure 1.4b) and concentric (Figure 1.4c).

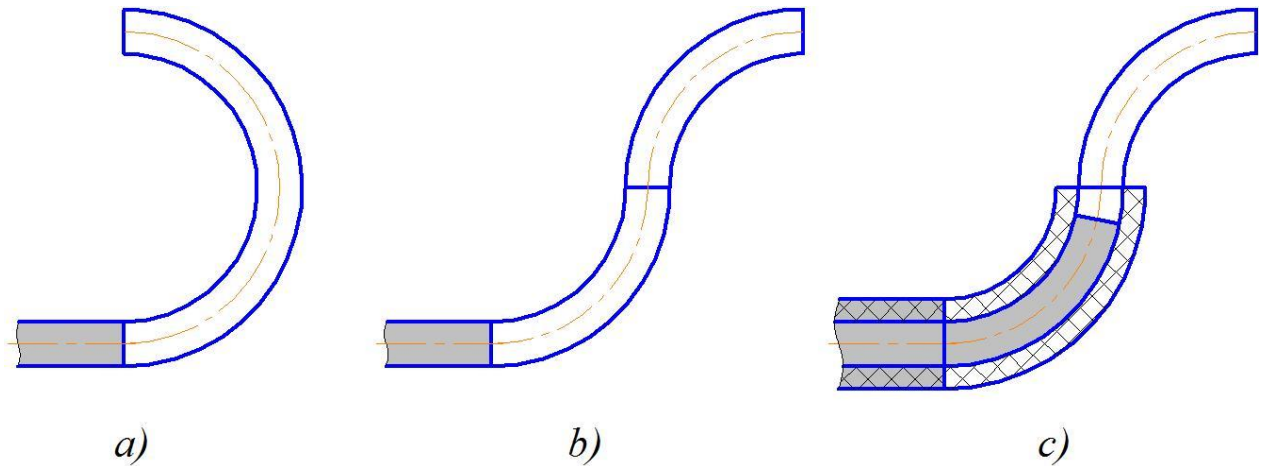


Figure 1.4. Catheter designs. Gray color indicates non-steerable parts. *a)* Catheter with one bending section; *b)* Catheter with two serial bending sections; *c)* Catheter with two concentric bending sections

Serial catheters are several bending sections installed one after another. The sections can be designed to have any desired shape, and can be interconnected by different types of joints, which allows one-, two-plane or spatial relative motion. Multiple section can be combined together to form one steerable segment, so that it is possible to obtain an S-shaped curve. An example of such a catheter is described in Kabe et al. [14], which is used for repairing mitral valve and other catheter-based interventions with device implantation.

Concentric catheters contain many tubes located inside each other. Tubes can move inside each other. They can have a different preferred bending direction, depending on their design and material, or they can be actively steered. An example of such a catheter is described in the patent [12], which is used in the commercially available Sensei X Robotic Catheter System (Hansen Medical, Mountain View, CA, USA).

### 1.6.1 Joints used in robotics catheters

Robotic catheters for providing stability are usually made from materials which are more rigid than those used in manual catheters. To ensure flexibility in robotic catheters, various types of joints are used (Figure 1.5).

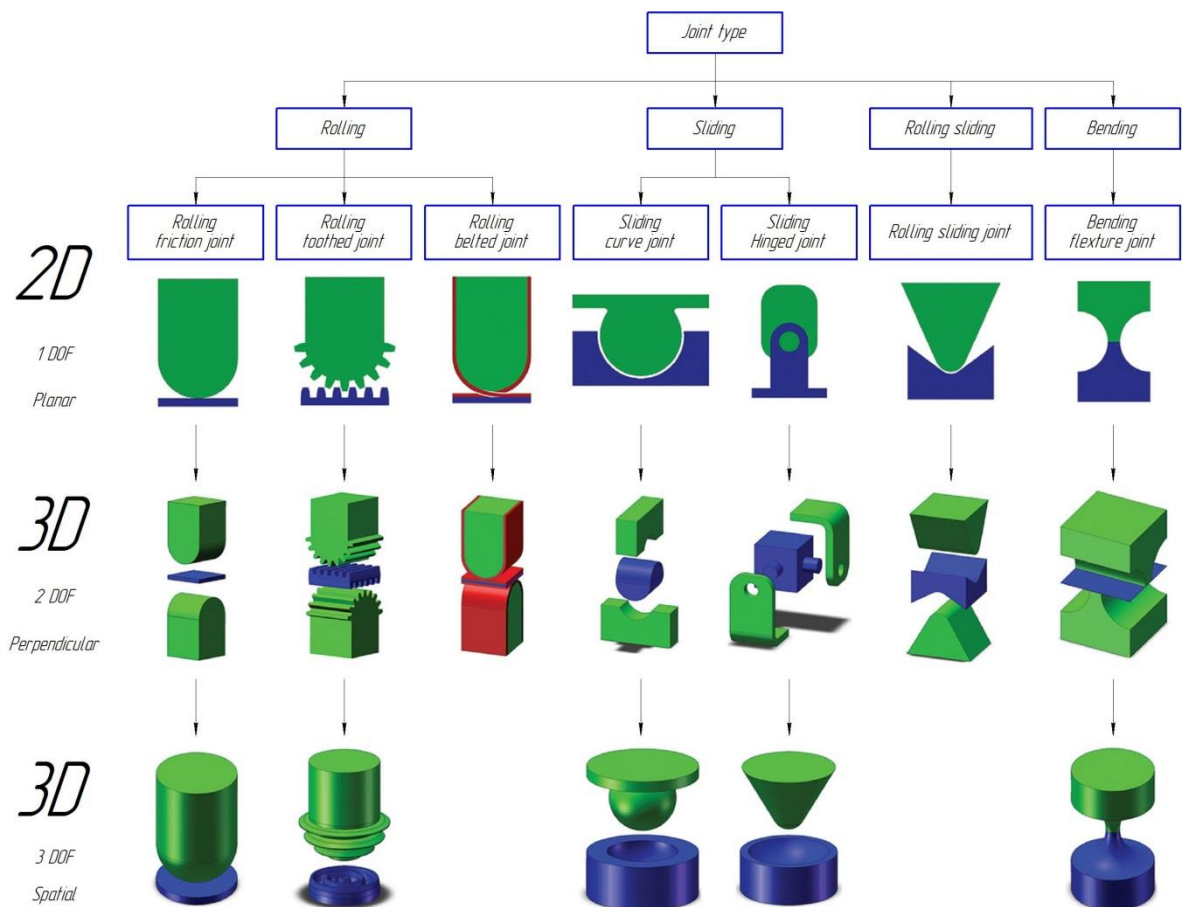


Figure 1.5. Joints used in robotic catheters [15]

Joints presented above are different in their effectiveness (Table 1.1). The most effective type of hinge is a flexible micromechanical [16] hinge. Of these, Hooke's micromechanical hinges and spherical micromechanical hinges are equally effective.



Table 1.1. Qualitative evaluation of the joint types with regard to their performance in several merits related to the joint geometry and motion. Performance is evaluated as good (1), neutral (0), or weak (2). [15]

Joint type			Merit							
			Preventing axial split	Preventing transverse split	Preventing slip	Torsional stiffness	Space efficiency	Providing inner lumen	Overall design complexity	Total
Rolling	Friction	Planar	-	-	-	-	-	+	+	-3
		Perpendicular	-	-	-	-	0	+	+	-2
		Spatial	-	-	-	-	+	0	+	-2
	Toothed	Planar	-	+	+	+	-	0	-	0
		Perpendicular	-	+	+	+	0	0	-	1
		Spatial	-	+	+	-	+	-	-	-1
	Belted	Planar	+	+	+	+	-	-	-	1
		Perpendicular	+	+	+	+	0	-	-	2
Sliding	Curved	Planar	0	+	+	+	-	+	0	3
		Perpendicular	0	+	+	+	0	+	0	4
		Spatial	0	+	+	0	+	+	0	4
	Hinged	Planar	+	+	+	+	-	0	-	2
		Perpendicular	+	+	+	+	+	0	-	4
Rolling sliding		Planar	-	0	0	0	0	+	+	0
		Perpendicular	-	0	0	0	-	+	+	1
		Spatial	-	-	0	-	+	+	+	0
Bending flexure		Planar	+	+	+	+	-	+	+	5
		Perpendicular	+	+	+	+	0	+	+	6
		Spatial	+	+	+	0	+	+	+	6

## 1.6.2 Actuators

Actuator is a complete universal operation unit with or without motor (electromechanical or mechanical) controlled by a control device. Actuators are responsible for controlling bending of catheter. According to method of actuation, actuators are divided into several types (Figure 1.6). However, in practice, only actuators actuated by mechanical cable or magnetic field are used in robotic systems.



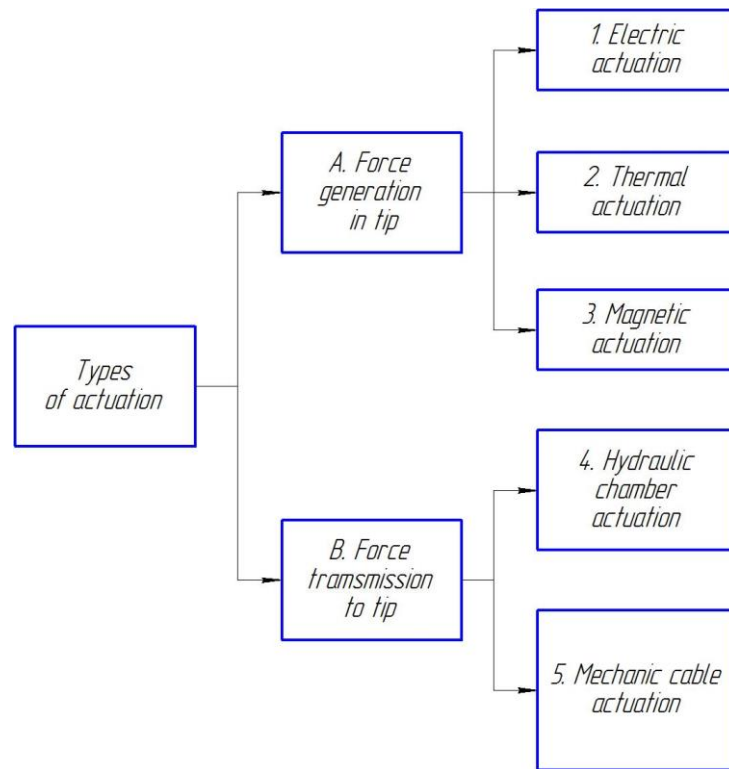


Figure 1.6. Types of actuation [15]

Currently, two robotic catheter systems are used in clinical practice: electromechanical and magnetically controlled systems.

The robotic navigation system Sensei X from Hansen Medical (Figure 1.7) is a steerable catheter system for electrophysiological interventions in the heart [17]. Surgeon's workplace is in control room, while robotic catheter remains in operating room. Thus, doctor does not undergo X-rays, which is necessary to visualize the position of the catheter. The system provides 6 degrees of freedom and allows transferring surgeon's movements to catheter's tip, while outer sheath provides stability. The Sensei X system works with a catheter that is designed to provide simultaneous steering of the catheter's tip and the sheath, which allows for more accurate positioning. Catheter steering is achieved by adjusting the tension of wires laid along channels in two concentric sheaths. Position of the wires is regulated by winding and unwinding the wires attached to the drives' shafts. Doctor remotely controls catheter's tip using a three-dimensional input device on workstation. This system has increased safety and ability to reduce time under irradiation for doctor.



Figure 1.7. Sensei X by Hansen Medical

The Niobe system by Stereotaxis, Inc., (Figure 8) for robotic electrophysiological procedures is operating catheter remotely by a magnetic field [18]. The system consists of two external permanent magnets with a focused field, mounted at manipulator on both sides of operating table. By changing their orientation and position, a homogeneous magnetic field controls catheter's tip inside patient. Within magnetic field, magnetic tool can move in any direction. To reduce radiation exposure of the doctor, the Niobe system also has a separate workstation.



Figure 1.8. Niobe system by Stereotaxis, Inc

Manual catheters basically have only one pull-wire that makes only one movement – one-plane bending, which by the rotation of the catheter's grip by surgeon

becomes a spatial. Robotic catheters have several perimeter-located wires that perform spatial bending due to their combination.

## **1.7 Materials**

Various medical grade materials are used for catheters production: from flexible polymeric rubbers to Nickel titanium (NiTi - Nitinol), titanium or steel. In most cases, manual catheters are made of polymer rubber with metal braid. Nitinol is used for production of robotic catheters because of its superelastic property. The effect of superelasticity is the ability of Nitinol alloys to have a large (up to 8%) "elastic" deformation.

The product must meet the requirements of State Standard ISO 10993-1-2011 for products that are connected externally in circulating blood with short-term contact [19].

## **1.8 Kinematics**

Kinematics considers the motion of frame in a robotic mechanism without taking into account the forces and/or torque that cause motion. Since robotic mechanisms are inherently designed for motion, the kinematics is the most fundamental aspect of design, analysis, control and modeling.

### **1.8.1 Forward kinematics**

The task of forward kinematics is to find the coordinates of all segments of the mechanism in space according to their geometric structure and relative position and orientation.

At the moment, two approaches to direct kinematics of continuous robots are known: discrete (Figure 10a) and constant curvature (Fig. 10b). Both approaches can be used for pseudocontinuum robots.

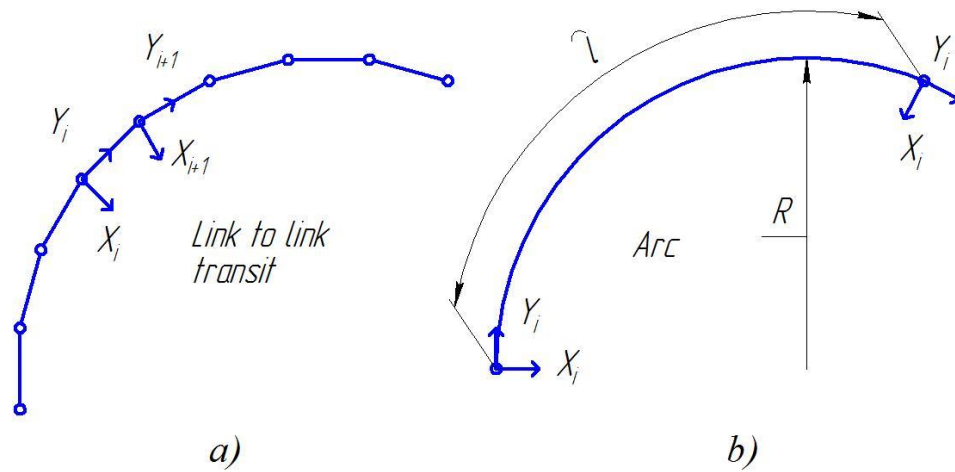


Figure 1.9. a) discrete approach; b) constant curvature approach

In a discrete approach, robot is represented as consisting of rigid link, connected in series by joints. In this approach, the calculation is performed using concepts of Denavite-Hartenberg. This approach is appropriate both for continuum, and pseudocontinuum robots.

Unlike discrete model, constant curvature kinematics represent continuum geometry of robot by a finite number of mutually tangential curved segments, each of which has a constant curvature along its length. It should be noted that here "constancy" refers to invariance with respect to arc length, and not time. In this approach, curvature, arc length and angle of each segment form a set of configuration coordinates that fully describe the robot's shape, that is, position and orientation at any point. Models based on constant curvature are most widely used to calculate forward kinematics of continuum robots.

### 1.8.2 Inverse kinematics

The task of inverse kinematics is to find relative position and orientation of all segments of mechanism according to their coordinates in space. Due to inverse kinematics algorithms, automatic catheter positioning is performed. Analytic and numerical methods are used to solve inverse kinematics [20].

At present, there are algorithms of inverse kinematics that allow automatic positioning of catheter at a certain point. However, they are either unable to control the

orientation of catheter's tip [1-4], or are designed to work with a catheter consisting of only one shoulder flexure [5].

### 1.8.3 Heuristic algorithm FABRIK

This method, unlike the inverse transformation, changes the task of finding the position of a link in the task of finding a point on a line. It achieves a minimization error by a one-time adjustment of angle of each link (Figure 1.10). Entire chain is traversed from end to beginning, with adjustment of angle of each bypassed link, and then chain is traversed in opposite direction. Due to this, calculation need only a few iterations, has a low cost of computation and a visually natural posture as a result of [21]. FABRIK also copes with imposition of constraint without problems, as well as use of several chains and/or endpoints.

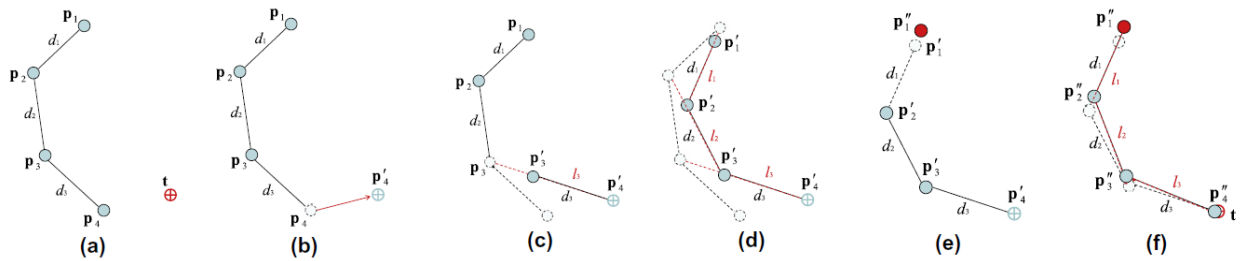
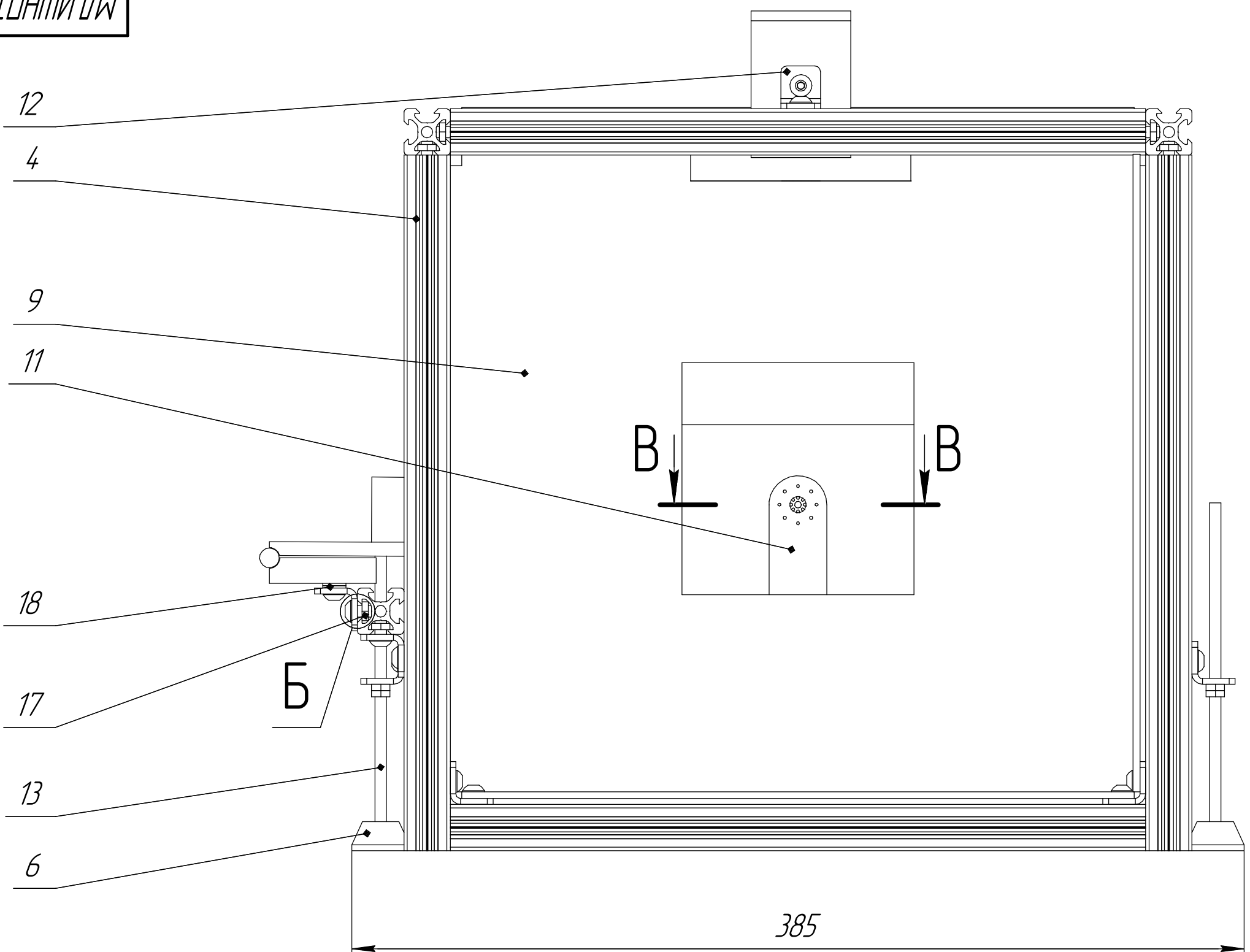


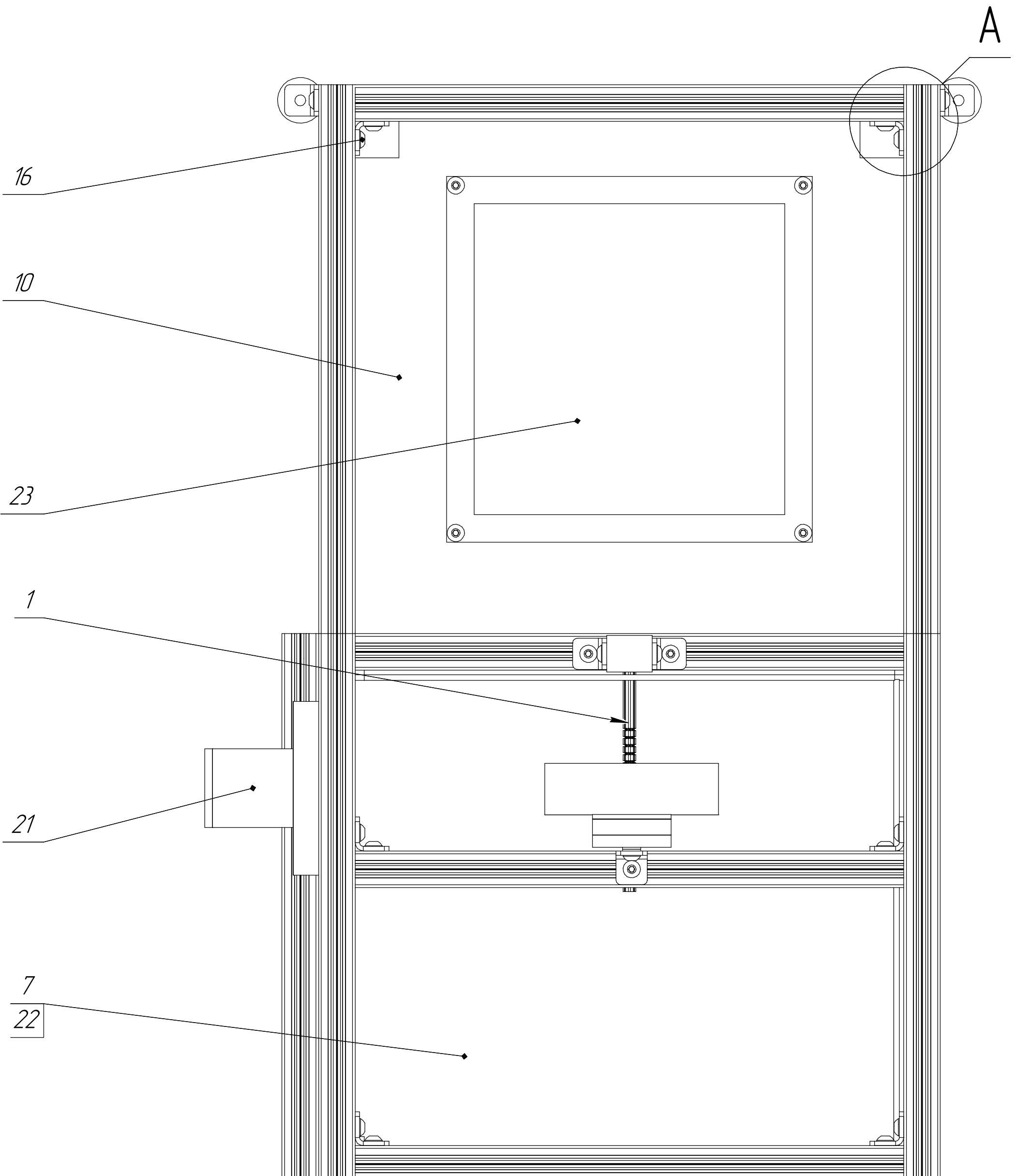
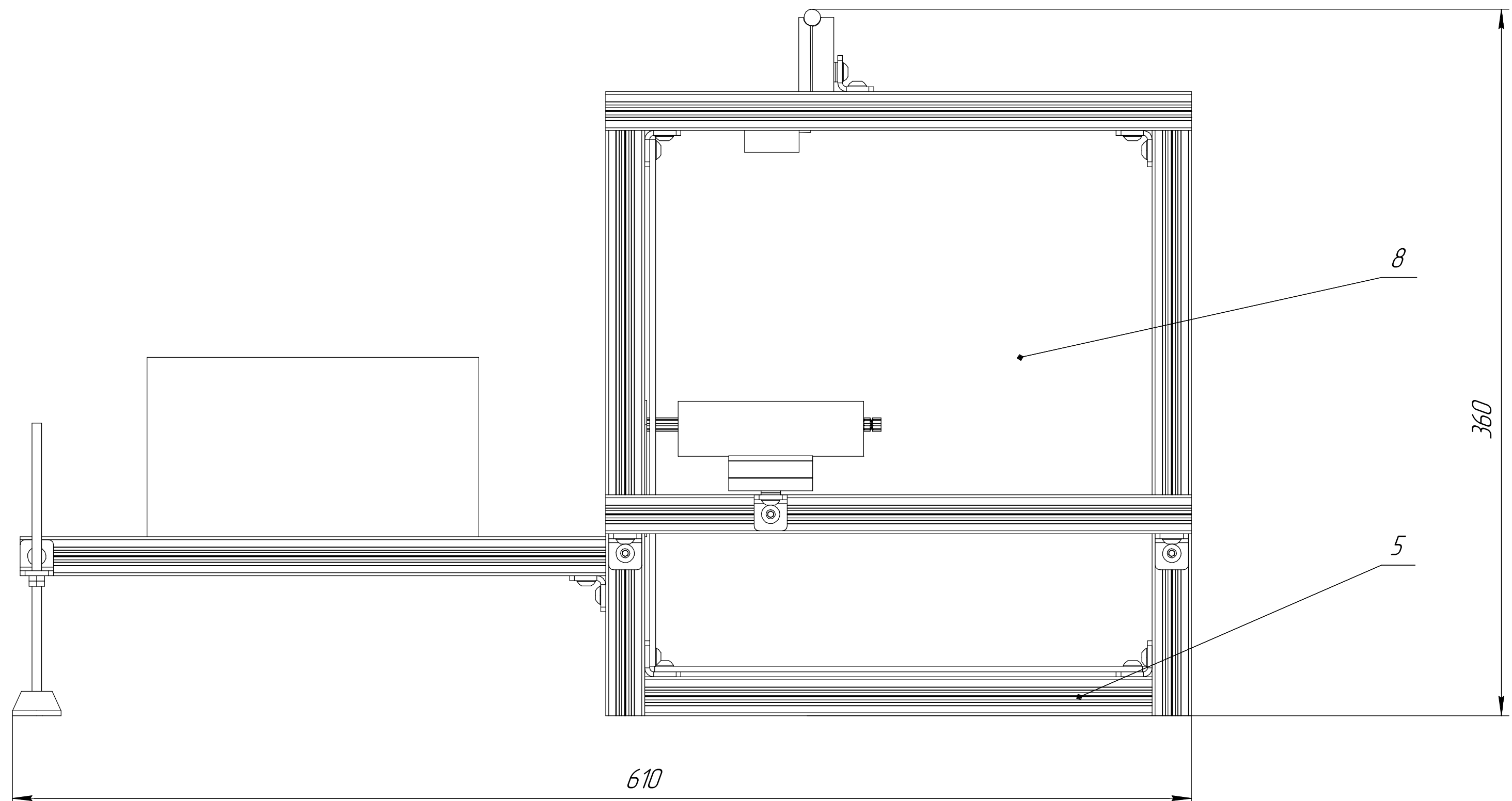
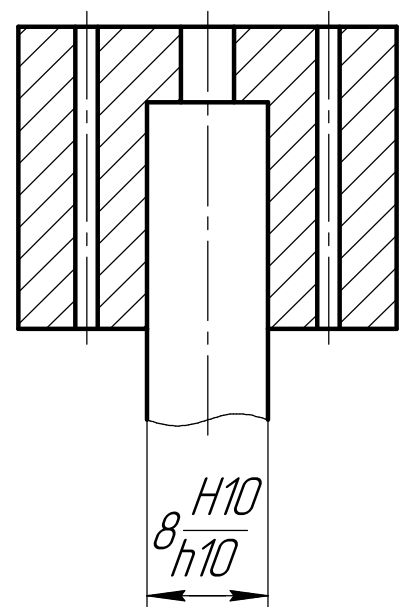
Figure 1.10. FABRIK method [21].

### 1.8.3 Conclusion

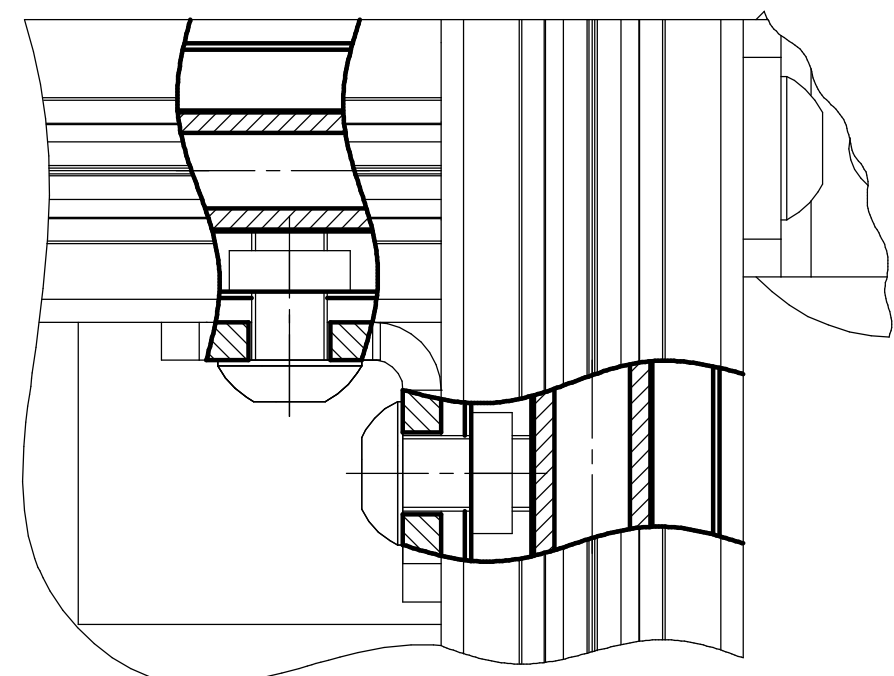
Summing up, it is possible to say that the most promising way of treating CVD is cardiac catheterization. Cardiac catheterization by robotic catheters is the most effective way in terms of performance and safety. In the design of robotic catheters, flexible hinges are most often used to give robot sufficient mobility. The most common way to steer catheter is to steer it through pull-wires. At the moment, robotic catheters are steered manually by surgeons. This is due to the shortcomings in solving kinematics for this type of robot. In this paper, to define the mechanism of direct kinematics, a constant curve approach will be used. To define the mechanism of inverse kinematics, the FABRIK method, modified to work with robotic catheters, will be used.



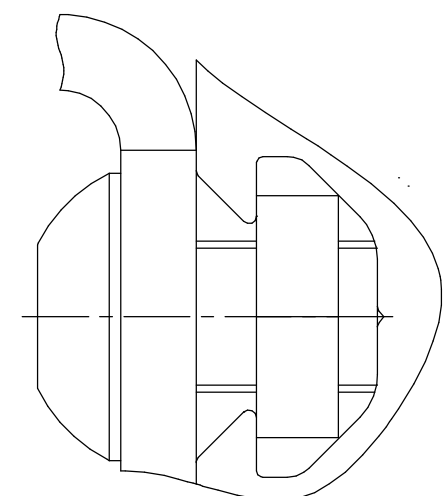
В-В (2:1)



А (2:1)



Б (4:1)



1. Камеры (поз. 21) перед закреплением отрегулировать
2. После сборки отрегулировать натяжение нитей на катетере (поз. 1)
3. H14, h14,  $\frac{IT14}{2}$

					МД.ИШНПТ.1504.01.000 СБ					
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Стенд сборочный чертёж			Лист	Масса	Масштаб
Разраб.	Колосников Д.В.	Проб.	Арляпов А.Ю.							12
Т.контр.										
И.контр.					Приложение Б			Лист	Листов	1
Утв.								ТПУ ИШНПТ Группа 8/М61		
					Копировать			Формат А1		

## Приложение В

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
Справ. №						<u>Документация</u>			
		A1			МД.ИШНПТ.150401.000 СБ	сборочный чертеж			
		A3			МД.ИШНПТ.150401.000 Е1	Схема деления структурная			
						<u>Сборочные единицы</u>			
			1		Катетер	1			
						<u>Детали</u>			
Подп. и дата			4		Профиль конструкционный 20x20x300	15			
			5		Профиль конструкционный 20x20x260	2			
			6		Ножка	2			
			7		Нижняя стенка	1			
			8		Боковая стенка	1			
			9		Задняя стенка	1			
			10		Панель	1			
			11		Оправка	1			
			12		Уголок 20x20x3	34			
			13		Штанга с резьбой DIN 975 M5x150	2			
		Взам. инв. №						МД.ИШНПТ.150401.000	
Изм.	Лист			№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.	Колпацков П.Ю.								
Пров.	Арлянов А.Ю.								
Н.контр.									
Утв.									
Стенд сборочный чертеж				Лит.	Лист	Листов			
					1	2			
				ТПУ ИШНПТ Группа 8/М61					
Подп. и дата						Копировал			
						Формат А4			
Инв. № подл.									





